

Universität Zürich
Zentrum für Zahnmedizin
Klinik für Präventivzahnmedizin, Parodontologie und Kariologie (PPK)
Direktor: Prof. Dr. med. dent. T. Attin

Arbeit unter Leitung von Dr. med. dent. F. Paqué

**Die Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle mit verschiedenen
Aufbereitungstechniken: eine In-vitro-Analyse mit
Mikro-Computertomographie**

INAUGURAL-DISSERTATION

zur Erlangung der Doktorwürde der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Universität Zürich

vorgelegt von
Marc Balmer
von Escholzmat LU

Genehmigt auf Antrag von Prof. Dr. med. dent. T. Attin
Zürich 2011

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	3
1 ZUSAMMENFASSUNG	6
2 EINFÜHRUNG	8
3 LITERATURÜBERSICHT	10
3.1 Wurzelkanalanatomie – Inzidenz ovaler Wurzelkanäle	10
3.2 Probleme bei der Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle.....	13
3.2.1 Aufbereitung mit Handinstrumenten	17
3.2.2 Zirkumferentes Feilen mit Handinstrumenten	19
3.2.3 Maschinelle Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten	20
3.2.4 Zirkumferentes Feilen mit NiTi-Instrumenten	22
3.3 Alternative Techniken zur Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle	23
3.4 In der Studie verwendete Techniken.....	24
3.4.1 Das ProTaper-System.....	24
3.4.2 Lösungsansätze für das Bearbeiten ovaler Wurzelkanäle mit ProTaper-Instrumenten.....	28
4 VERSUCHSPLANUNG.....	30
5 MATERIAL UND METHODE	31
5.1 Versuchsvorbereitung	31
5.1.1 Auswahl der Zähne	31
5.1.2 Einbetten der Zähne	31
5.1.3 Mikro-Computertomographie.....	32
5.1.4 Bestimmung der Arbeitslänge.....	32
5.1.5 Gruppenzuweisung der Zähne	33
5.2 Aufbereitung der Zähne.....	33
5.2.1 Vorversuch	33
5.2.2 Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen	34
5.2.3 Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten	34
5.2.4 Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten unter Simulation von zwei Wurzelkanälen	35
5.2.5 Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper-Instrumenten.....	35

5.3 Zweite hochauflösende Mikro-Computertomographie	36
5.4 Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe II durch zirkumferentes Feilen	36
5.5 Arbeitsprotokolle	38
5.6 Auswertung der Daten und Statistik	42
6 RESULTATE	44
6.1 Vergleich der Daten vor Aufbereitung der Wurzelkanäle	44
6.1.1 Vergleich der gesamten Wurzelkanalvolumina	45
6.1.2 Vergleich der apikalen Wurzelkanalvolumina	46
6.1.3 Vergleich der gesamten Wurzelkanaloberflächen.....	47
6.1.4 Vergleich der apikalen Wurzelkanaloberflächen.....	48
6.2 Vergleich der Daten nach Aufbereitung der Wurzelkanäle	49
6.2.1 Vergleich des Dentinabtrags	49
6.2.2 Unbearbeitete Wurzelkanalwände	51
6.2.3 Unbearbeitete apikale Wurzelkanalwände	54
7 DISKUSSION	55
7.1 Diskussion der Methode.....	55
7.1.1 Mikro-Computertomographie.....	55
7.1.2 Auswahl der Präparate	57
7.2 Diskussion der Ergebnisse vor der Aufbereitung der Wurzelkanäle	58
7.3 Diskussion der Ergebnisse nach der Aufbereitung der Wurzelkanäle	59
7.3.1 Vergleich des Dentinabtrags	59
7.3.2 Vergleich der unbearbeiteten Wurzelkanalwände.....	61
8 LITERATURVERZEICHNIS	65
9 CURRICULUM VITAE	74

1 Zusammenfassung

Ziel: Die Bewertung der Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle in distalen Wurzeln von Unterkiefer-Molaren unter Verwendung verschiedener Aufbereitungstechniken.

Material und Methode: Mit einem Mikro-Computertomographen wurden Unterkiefer-Molaren mit geringer Auflösung gescannt (68 μm) und dreidimensional rekonstruiert. 48 Molaren mit ovalen oder länglich ovalen, distalen Wurzelkanälen wurden ausgewählt und randomisiert vier Gruppen zugeteilt. Die distalen Wurzelkanäle ($n=12$) wurden wie folgt aufbereitet: mit Hedstroem-Feilen durch zirkumferentes Feilen bis zu einer apikalen Größe von ISO 40 (Gruppe I); mit rotierenden ProTaper-Instrumenten bis zur Größe F4, wobei der Kanal wie ein einzelner Kanal behandelt wurde (Gruppe II); mit ProTaper-Instrumenten bis zur Größe F4, wobei der Kanal bukkal und oral präpariert wurde, wie wenn es zwei Kanäle wären (Gruppe III); mit ProTaper-Instrumenten bis zur Größe F4 durch zirkumferentes Feilen (Gruppe IV). Die Kanäle der Gruppe II wurde nach einer ersten Auswertung durch zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen nachbearbeitet und ein weiteres Mal ausgewertet (Gruppe V).

Die Zähne wurden vor und nach der Aufbereitung mit einem Mikro-Computertomographen in einer Auflösung von 34 μm gescannt und anschließend ausgewertet. Der Anteil der bearbeiteten Flächen wurde für die ganze Länge des Wurzelkanals und für die apikalen vier Millimeter berechnet. Die ermittelten Daten waren normal verteilt (Shapiro-Wilk-Test). Die Unterschiede zwischen den experimentellen Gruppen wurden mit der Varianzanalyse ANOVA und anschließenden Tukey-Kramer-HSD-Test auf signifikante Unterschiede untersucht. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0.05$ festgelegt.

Resultate: Präoperativ konnte zwischen den Gruppen kein statischer Unterschied in der Anatomie der Wurzelkanäle gefunden werden ($p=0.21$). Der Mittelwert \pm Standardabweichung der unbearbeiteten Fläche über die gesamte Länge des Kanals reichte postoperativ von $59.6 \pm 14.9\%$ (Gruppe III) bis $80.0 \pm 10.3\%$ (Gruppe II) und im apikalen Abschnitt von $52.7 \pm 20.3\%$ (Gruppe V) bis $76.1 \pm 17.0\%$ (Gruppe I). Die Wurzelkanäle der Gruppe II wiesen eine größere unbearbeitete Fläche auf ($p < 0.01$)

als in der Gruppe III. In den apikalen vier Millimetern konnte zwischen den Gruppen kein statistisch signifikanter Unterschied im Anteil der bearbeiteten Flächen ermittelt werden.

Schlussfolgerung: Die Aufbereitung ovaler Kanäle in distalen Wurzeln von Unterkiefer-Molaren hinterließ einen unterschiedlich großen Anteil von unbearbeiteten Flächen, unabhängig von der verwendeten Instrumentationstechnik. Wurden die ovalen Kanäle bei der Aufbereitung wie zwei einzelne Kanäle präpariert, zeigte sich tendenziell eine überlegene Reinigung des Kanals im Vergleich zu den übrigen Aufbereitungsmodi.

2 Einführung

Einer der wichtigsten Arbeitsschritte bei der Wurzelkanalbehandlung ist die gründliche Entfernung von Pulpagewebe, Mikroorganismen und Debris aus dem Wurzelkanalsystem durch eine chemomechanische Präparation (European Society of Endodontology 2006). Zu diesem Zweck sollte der Kanal so aufbereitet werden, dass eine gleichmäßig konische und von apikal nach koronal kontinuierlich größer werdende Form entsteht, die den Umriss des präoperativen Kanals umfasst (European Society of Endodontology 2006, Schilder 1974). Allerdings ist die Anatomie des Wurzelkanalsystems sehr komplex und die mechanische Aufbereitung kann zu Präparationsfehlern führen (Siqueira et al. 1997). Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sowohl die Verwendung von konventionellen Handfeilen als auch die Verwendung von modernen, permanent rotierenden Nickel-Titan-Instrumenten (NiTi-Instrumenten) nicht zu einer vollständig bearbeiteten Wurzelkanaloberfläche führt. In verschiedenen In-vitro-Studien verblieben mehr als 20 bis 40% der Wurzelkanaloberfläche nach der Wurzelkanalaufbereitung unbearbeitet (Peters 2004, Wu und Wesselink 2001, Tucker et al. 1997).

Die anatomische Konfiguration vieler Wurzelkanäle entspricht üblicherweise nicht einer runden und trichterförmigen Form (Schilder 1974). Kürzlich wurden von Jou et al. (2004) die Querschnittsformen von Wurzelkanälen in rund, oval, länglich oval, abgeflacht und unregelmäßig eingeteilt. Die Autoren definierten als oval einen Querschnitt, dessen größerer Durchmesser bis zu zweimal mehr als der kleinere Durchmesser ist und als länglich oval einen Querschnitt, dessen größerer Durchmesser zwischen zwei und viermal größer als der kleinere Durchmesser ist.

Die Prävalenz ovaler und länglich ovaler Kanälen im apikalen Abschnitt von Wurzelkanälen ist hoch (Wu et al. 2000a, Gani und Visvisian 1999, Mauger et al. 1998). Gemäß Wu et al. (2000a) liegt sie für länglich ovale Wurzelkanäle durchschnittlich bei circa 25%; bei manchen Zähnen und Zahntypen, wie zum Beispiel bei den unteren Schneidezähnen und den zweiten Prämolaren des Oberkiefers, ist die Prävalenz größer als 50% und bei den distalen Wurzeln von Unterkiefer-Molaren liegt sie zwischen 25 und 30%. Diese Komplexität der Anatomie kann als eine der großen Herausforderungen in der Infektionskontrolle durch Wurzelkanalaufbereitungen angesehen werden.

Eines der Ziele bei der Präparation von infizierten Wurzelkanälen ist die Entfernung der inneren Dentinschicht (Wu und Wesselink 2001). Dieses Ziel ist besonders bei der Präparation länglich ovaler Wurzelkanälen schwer zu erreichen. Die Präparation ovaler Wurzelkanälen führt oft zu unbearbeiteten Abschnitten, unabhängig von der verwendeten Instrumentationstechnik. In diesen Abschnitten bleiben Debris und unbearbeitete Wurzelkanaloberflächen zurück (Grande et al. 2007, Wu et al. 2003, Barbizam et al. 2002, Rödiger et al. 2002, Weiger et al. 2002, Wu und Wesselink 2001). Verschiedene Instrumentationstechniken wurden empfohlen, um die Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle zu verbessern (Wu et al. 2003). Die am weitesten verbreitete Technik mit Handinstrumenten ist das zirkumferente Feilen mit K- oder Hedstroem-Feilen. Nach der Einführung von rotierenden NiTi-Instrumenten wurden diese ebenfalls daraufhin getestet, wie gut sie ovale Wurzelkanäle in extrahierten Zähnen aufbereiten (Weiger et al. 2002). In dieser Studie konnte gezeigt werden, dass die zirkumferente Aufbereitung mit rotierenden NiTi-Instrumenten den Handaufbereitungstechniken nicht überlegen war. Vor kurzem jedoch konnte gezeigt werden, dass die Verwendung rotierender Instrumente mit einer Konizität von 4% oder größer effizienter bei der Aufbereitung ovaler Kanäle war als die Verwendung von Handinstrumenten (Elayouti et al. 2008). Allerdings konnten auch in dieser Studie die sehr konischen NiTi-Instrumente die ovalen Wurzelkanalwände nicht vollständig bearbeiten.

Die oben genannten Studien wurden an Wurzeln extrahierter Zähne durchgeführt, welche vor der Aufbereitung in Segmente geschnitten wurden. Die Wurzelquerschnitte wurden vor und nach der Aufbereitung vermessen, was einer zweidimensionalen Analyse entspricht. Die Technik der Mikro-Computertomographie erlaubt eine dreidimensionale Beschreibung der Auswirkung, welches die Wurzelkanalaufbereitung auf die Wurzelkanalanatomie ausübt, ohne die Wurzel während des Experiments zu verändern (Peters 2004).

Die unbearbeitete Wurzelkanaloberfläche kann als ein dreidimensionales Maß für die Vollständigkeit einer Aufbereitung gesehen werden. Die Aufbereitungen mit verschiedenen Instrumenten oder in verschiedenen Kanaltypen können so miteinander verglichen werden (Paqué et al. 2009). Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es, die bearbeiteten Flächen ovaler Wurzelkanäle in Unterkiefer-Molaren nach Bearbeitung mit verschiedenen Instrumentationstechniken zu bewerten.

3 Literaturübersicht

3.1 Wurzelkanalanatomie – Inzidenz ovaler Wurzelkanäle

Das Wurzelkanalsystem stellt eine komplexe, dreidimensionale Struktur dar (Hess 1921). Wurzelkanäle weisen eine große Variabilität in ihrer Form und ihrer Länge auf. Ausgeprägte Krümmungen und verschiedene Querschnittskonfigurationen sind regelmäßig anzutreffen. Für eine vollständige Präparation des Wurzelkanalsystems ist die genaue Kenntnis der anatomischen Form eine Grundvoraussetzung, welche jedoch für den Zahnarzt durch konventionelle Röntgenbilder nur schwer darstellbar ist (Cunningham und Senia 1992).

Unterkiefer-Molaren haben normalerweise eine mesiale und distale Wurzel und zusammen mindestens drei Hauptkanäle aufweisen (Abb. 3.1). Daneben gibt es aber auch unregelmäßige Wurzelkonfigurationen. Der zweite Unterkiefer-Molar kann eine bis drei Wurzeln aufweisen und der erste Unterkiefer-Molar kann bis zu vier Wurzeln aufweisen (Rwenyonyi et al. 2009, Wasti et al. 2001, Maggiore et al. 1998, Hess 1921).

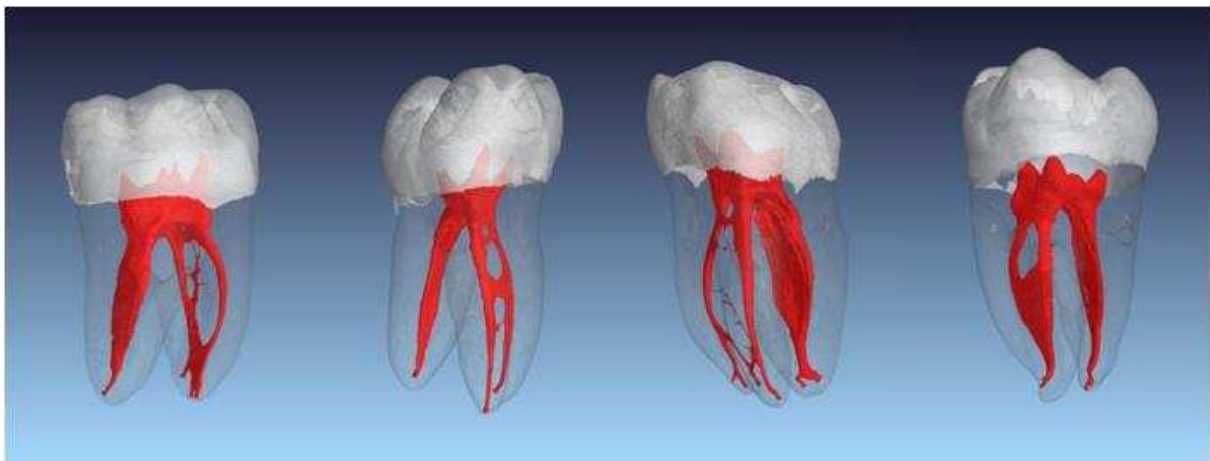


Abb. 3.1: Nach Scannen mit einem Mikro-Computertomographen rekonstruierte, dreidimensionale Darstellung von vier Unterkiefer-Molaren. Die Molaren weisen zwei separate Wurzelkanäle in der mesialen Wurzel und einen ovalen Wurzelkanal in der distalen Wurzel auf.

De Pablo et al. (2010) analysierten sämtliche durch die Medline-Datenbank zwischen den Jahren 1966 und 2010 verfügbaren Publikationen über die Wurzelanatomie und

die Wurzelkanalmorphologie der bleibenden Unterkiefer-Molaren. Mit einem Total von 41 Studien und dabei 18781 untersuchten Zähnen erhielten sie folgende Durchschnittswerte: Die Inzidenz einer dritten Wurzel in Unterkiefer-Molaren beträgt ca. 13%. Drei Kanäle werden in 61.3%, vier Kanäle in 35.7% und fünf Kanäle in ca. 1% gefunden.

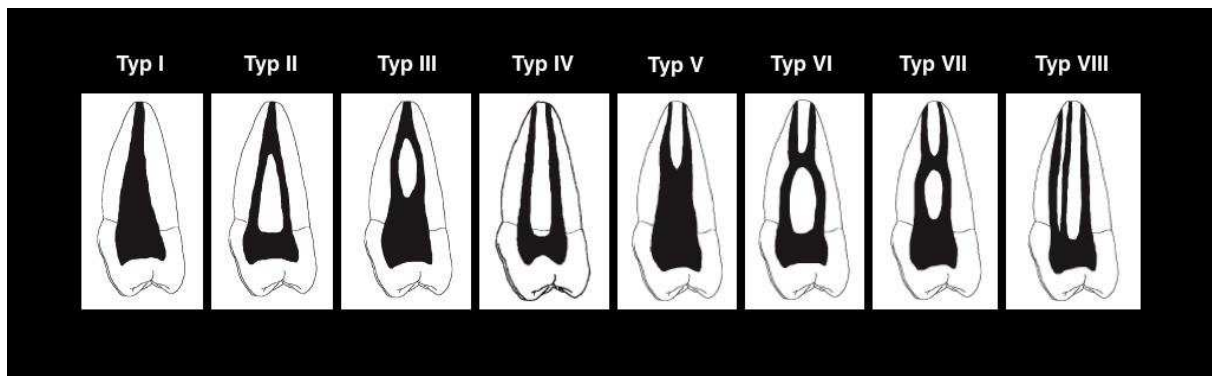


Abb. 3.2: Klassifizierung der Wurzelkanalkonfigurationen innerhalb einer Wurzel nach Vertucci.

Die mesiale Wurzel weist in 94.4% zwei Kanäle und in 2.3% drei Kanäle auf. Bei zwei Kanälen verlaufen diese in 52.3% zuerst gemeinsam und verzweigen sich dann im mittleren oder apikalen Drittel (Vertucci Typ IV, Abb. 3.2). In 35% sind es zwei getrennte Kanäle, die sich kurz vor dem Apex vereinigen (Typ II). Die distale Wurzel hat am häufigsten (62.7%) einen einzelnen Wurzelkanal (Typ I), gefolgt von Typ II (14.5%) und Typ IV (12.4%).

Die horizontale Dimension des Wurzelkanalsystems (Querschnitt) ist nicht nur komplizierter als die vertikale Dimension (Länge und Konizität) darzustellen, sondern auch schwieriger zu untersuchen, da die horizontale Dimension im Verlauf des Kanals stark variiert. Die koronale Querschnittsform ist nicht zwangsläufig im gesamten Kanalverlauf zu finden (Jou et al. 2004, Mauger et al. 1998).

Jou et al. (2004) teilten die Querschnittsformen von Wurzelkanalkonfigurationen in rund, oval, länglich oval, abgeflacht und unregelmäßig ein (Tab. 3.1).

Einteilung der horizontalen Querschnitte von Wurzelkanälen durch Jou et al.

1. Rund:	Der kleinere Durchmesser entspricht dem grösseren Durchmesser.
2. Oval:	Der grössere Durchmesser ist bis zu zweifach grösser als der kleinere Durchmesser.
3. Länglich oval:	Der grössere Durchmesser ist zwei bis vier Mal grösser als der kleinere Durchmesser.
4. Abgeflacht:	Der grössere Durchmesser ist mehr als vier Mal so gross wie der kleinere Durchmesser.
5. Unregelmässig:	Querschnitt, der weder als rund, oval, länglich oval oder als abgeflacht bezeichnet werden kann.

Tab. 3.1: Einteilung der Querschnitte von Wurzelkanälen durch Jou et al. (2004)

Von einer hohen Prävalenz ovaler und länglich ovaler Kanälen im apikalen Abschnitt wurde mehrfach berichtet (Wu et al. 2000a, Gani und Visvisian 1999, Mauger et al. 1998). Laterale Extensionen oder ovale Wurzelkanäle können sich in allen Wurzelkanälen beziehungsweise Zähnen finden. Gemäß Wu et al. (2000a) liegt die Prävalenz länglich ovaler Wurzelkanälen im apikalen Drittel menschlicher Zähne durchschnittlich bei circa 25%; bei gewissen Zähnen und Zahntypen, wie zum Beispiel bei den unteren Schneidezähnen und den zweiten Prämolaren des Oberkiefers, ist die Prävalenz größer als 50%. Bei den distalen Wurzeln von Unterkiefer-Molaren liegt sie zwischen 25 und 30%. Es konnte gezeigt werden, dass die meisten ovalen Kanäle gegen den Apex im Querschnitt immer runder werden (Wu et al. 2000a, Mauger et al. 1998).

Gani und Visvisian (1999) zeigten, dass die durch Kalzifikationen mit dem Alter fortschreitende Verengung des Kanals keinen signifikanten Einfluss auf die Querschnittsform hat. Die Verengung des Kanalvolumens geschieht vor allem entlang dem kleineren Durchmesser, sodass ovale Kanäle auch bei älteren Patienten vorkommen.

3.2 Probleme bei der Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle

Der Großteil der intrakanalären Mikroorganismen befindet sich im koronalen Kanalanteil auf der Kanalwand in Form eines bakteriellen Biofilms, sowie im kanalnahen Wanddentin. Mit zunehmender Dauer der Infektion kommt es auch zur Besiedlung des apikalen Wurzeldentins (Nair 2006). Sind Bakterien einmal ins Wurzelkanalsystem gelangt, dringen sie in die Dentintubuli der Kanalwände ein und können für eine persistierende Wurzelkanalinfektion verantwortlich sein (Haapasalo und Orstavik 1987). Der Durchmesser der Dentintubuli ist mit 4 bis 5 µm groß genug, um eine solche Penetration zu erlauben (Valderhaug 1974).

Über die Penetrationstiefe der Bakterien in die Dentintubuli gibt es unterschiedliche Daten. Dabei kann die Penetrationstiefe bis zu 800 µm in die Dentinkanälchen und sogar bis an die Dentin-Zement-Grenze reichen (Peters et al. 2002). Bakterien, die bereits stärker in die Zahnstruktur, in laterale Kanäle oder Dentintubuli vorgedrungen sind, können offensichtlich schwieriger durch eine direkte Bearbeitung der Wurzelkanäle erreicht werden (Peters et al. 1995). Da in vielen Fällen die Bakterien sehr tief ins Dentin penetrieren, ist deren vollständige Entfernung aus den Dentintubuli durch eine Präparation mit Aufbereitungsinstrumenten unmöglich (Peters et al. 2001, Armitage et al. 1983).

Das Hauptziel bei der Wurzelkanalbehandlung ist das Entfernen aller Mikroorganismen sowie des gesamten vitalen und devitalen Gewebes aus dem Wurzelkanalsystem, um eine apikale Parodontitis zu vermeiden oder zur Ausheilung zu bringen (Haapasalo et al. 2005). Bei einer Infektion bis tief ins Wurzeldentin sind der Keimreduzierung durch alleinigen mechanischen Abtrag deutliche Grenzen gesetzt. Sie kann zwar zu einer erheblichen, jedoch nicht vollständigen Reduktion der Keimzahl führen (Nair 2006). Die Wurzelkanal desinfektion ist entscheidend für den Erfolg der Behandlung und wird durch die Kombination einer mechanischen Aufbereitung und einer chemischen Spülung des Kanalsystems bewirkt (Haapasalo et al. 2005).

Da in infizierten Wurzelkanälen die innere Dentinschicht Mikroorganismen enthält (Peters et al. 2001), sollte sie bei der Wurzelkanalaufbereitung komplett entfernt werden (Walton und Torabinejad 1996).

Besonders eine gründliche Präparation im apikalen Bereich scheint sehr wichtig zu sein, da die apikale Flora eine signifikante Rolle bezüglich des Misserfolgs von Wurzelkanalbehandlungen spielt (Nair et al. 1990). Mikroorganismen, die im apikalen Anteil des Wurzelkanals persistieren, können sich ebenfalls in Biofilmen organisieren (Nair et al. 2005) und gelten als Hauptgrund für Misserfolge in der endodontischen Therapie (Nair 2006).

Eine große Herausforderung bei der Aufbereitung von Wurzelkanälen ist das Festlegen einer abschließenden Präparationsgröße, die eine ausreichende Reinigung und Desinfektion sichert, ohne die Wurzel und den Zahn durch übermäßigen Substanzverlust zu schwächen. Über die Größe der notwendigen apikalen Erweiterung herrscht Uneinigkeit (Paqué et al. 2009). Da die Eindringtiefe der Mikroorganismen und ihrer Abbauprodukte in das Dentin unter klinischen Bedingungen nicht messbar ist, gibt es diesbezüglich gegensätzliche Aussagen.

Weiger et al. (2006) berichteten, dass das Entfernen einer 200 µm starken Dentinschicht von der Kanalwand genüge, um die Wurzelkanäle in Molaren suffizient aufzubereiten. In infizierten Wurzelkanälen könnte dies unter Umständen zu wenig sein, da Bakterien tiefer ins Dentin eindringen können (Peters et al. 1995).

Verschiedene Autoren empfehlen, den apikalen Wurzelkanal um drei ISO-Größen weiter aufzubereiten als die Größe der ersten auf Arbeitslänge schneidenden Feile (Jou et al. 2004, Weine et al. 1975). Mit dieser ersten auf Arbeitslänge schneidenden Feile soll der initiale apikale Durchmesser ertastet werden können und schließlich nach Verwendung der drei nächstgrößeren Instrumente die komplette innere Dentinschicht zusammen mit den Mikroorganismen entfernt werden.

Diese Empfehlung wird kontrovers diskutiert. Wu et al. (2002) konnten zeigen, dass die erste Feile mit Friktion im Kanal auf Arbeitslänge keineswegs mit der wahren apikalen Dimension des Kanals übereinstimmt. In 90% der untersuchten Fälle war der Durchmesser des Instrumentes kleiner als der kleinste Durchmesser des Wurzelkanals; die Diskrepanz betrug bis zu 0.19 mm.

Besonders in ovalen Wurzelkanälen kann nicht differenziert werden, ob dieses Instrument zirkulär oder nur an zwei Punkten eine apikale Friktion aufweist. Im Gegensatz zu einem runden Kanal entsprechen der größte und der kleinste Durchmesser in einem ovalen Kanal nicht derselben Größe: Die maximale Diskrepanz zwischen dem grössten und dem kleinsten Durchmesser kann bis zu 6-8 ISO-Feilen betragen (Jou et al. 2004). Mit der taktilen Empfindung kann somit

bestenfalls der kleinste Durchmesser eines ovalen Kanals bestimmt werden, nicht aber der größere Durchmesser. Weitere Faktoren wie starke Kanalkrümmungen und Dentikel können zudem die taktile Empfindung erheblich stören. Zudem ist nicht gesichert, ob die Erweiterung um drei ISO-Größen die innere Dentinschicht der gesamten Zirkumferenz der Kanalwand adäquat entfernt (Wu et al. 2002, Tan und Messer 2002).

Die Entfernung der gesamten inneren Dentinschicht in ovalen Kanälen ist im Vergleich zu runden Kanälen aufgrund der genannten Problematik erheblich schwieriger (Wu und Wesselink 2001). Da die meisten Aufbereitungssysteme mit einer drehenden Bewegung im Kanal angewendet werden, hinterlassen sie einen runden Querschnitt. In einem länglich ovalen Kanal würde eine Erweiterung um drei ISO-Größen nur die kleinere Dimension des Kanals bearbeiten; die größere Dimension wird nur minimal erweitert oder bleibt im schlechtesten Fall unberührt.

Grosse apikale Aufbereitungen wurden in der Vergangenheit empfohlen, um die gesamte Zirkumferenz des ovalen Wurzelkanals aufzubereiten (Tronstad 1991). Die Verwendung von grossen Feilen führte aber zu einer erheblichen Schwächung der Wurzel (Trope und Ray 1992).

Verschiedene Autoren haben zudem gezeigt, dass es unmöglich ist, in ovalen Kanälen eine runde apikale Aufbereitung ohne Perforation der Wurzel zu erreichen (Abb. 3.3). Die externe Dimension der Wurzel an der schmalsten Stelle ist in mehreren Zähnen kleiner als der Innendurchmesser an der breitesten Stelle des Wurzelkanals (Gani und Visvisian 1999, Kerekes und Tronstad 1977a, Kerekes und Tronstad 1977b, Kerekes und Tronstad 1977c).

Mauger et al. (1998) zeigten an ovalen Unterkiefer-Schneidezähnen, dass die Bearbeitung der größeren vestibulo-oralen Dimension des Kanals in diesen Zähnen unmöglich mit einer reinen Drehbewegung vollbracht werden konnte, da die mesio-distale Breite der Wurzel zu gering war. Zudem kann die Verwendung von grossen und damit steiferen Instrumenten in gekrümmten Kanälen zu einer lateralen Perforation in der Kurvatur führen (Wu et al. 2000b).

Somit sollte ein Kompromiss zwischen einer kleinen und sehr großen Apikalpräparation gefunden werden. Eine extensive Erweiterung des apikalen Kanalabschnitts birgt ein höheres Risiko der Begradigung, der Perforation und anderer Präparationsfehler, eine kleine Apikalpräparation die Gefahr des

Zurücklassens von Mikroorganismen und eine eingeschränkte Effektivität der Spülung (Hülsmann 2000).

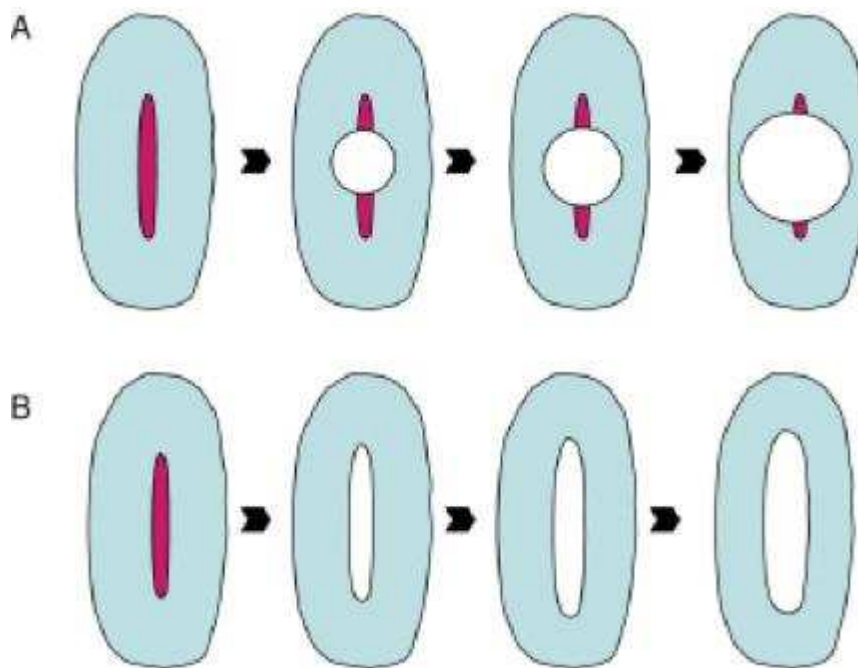


Abb. 3.3: Reihe A zeigt die runde Aufbereitung eines ovalen Kanals. Der vestibuläre und orale Recessus bleiben unbearbeitet, während die Präparation in mesio-distaler Richtung nur eine dünne Dentinwand hinterlässt. Reihe B zeigt eine anatomisch gerechte Aufbereitung eines ovalen Kanals. Die Oberflächen werden vollständig und gleichmässig bearbeitet. Die verbleibende Dentinwand ist überall gleich stark. (Modifiziert nach Metzger et al. 2010)

Laterale Extensionen ovaler Wurzelkanäle bleiben intraoperativ häufig unentdeckt und können nicht auf Sauberkeit kontrolliert werden. Eine gezielte Instrumentierung ist dann nicht möglich. Aufgrund der beschränkten Effizienz von Spülungen in solchen Recessus können sich dort Gewebe und Mikroorganismen ansammeln und auf diesen unbearbeiteten Flächen der Wurzelkanalwand verbleiben, was die Qualität der Obturation und den Langzeiterfolg der Therapie vermindern kann (Rödig et al. 2002).

Obwohl die lateralen Extensionen ovaler Wurzelkanäle nicht suffizient gereinigt werden können, sollte versucht werden, diese Extensionen mit Guttapercha und Sealer komplett abzudichten (Gutmann 1998). Durch das Füllen dieser Ausläufer können Bakterien eingeschlossen werden, so dass sie von Nährstoffquellen isoliert werden (Peters et al. 1995).

3.2.1 Aufbereitung mit Handinstrumenten

Obwohl Präparationsinstrumente für die Wurzelkanalaufbereitung ständig weiterentwickelt und verbessert wurden, ist ein vollständiges mechanisches Debridement durch Wurzelkanalinstrumente unmöglich. Einer der Hauptgründe dafür ist die geometrische Asymmetrie zwischen dem Wurzelkanal und den Präparationsinstrumenten (Aydin et al. 2007, Rödiger et al. 2007). Instrumente produzieren, wenn sie in einer rotierenden Bewegung benutzt werden, unabhängig ihrer Form und Typ eine Präparation mit rundem Umriss, der in den meisten Fällen nicht mit der Umrissform des Wurzelkanals übereinstimmt. Die bekanntesten manuellen Aufbereitungstechniken sehen eine rotierende Bewegung vor (wie zum Beispiel die balanced force-Technik), was zu einer runden Wurzelkanalpräparation führt. Infolgedessen wird normalerweise eine ungenügende Präparation beobachtet, wenn der Kanalumriss von einer runden Form abweicht (Elayouti et al. 2008). Die Gründe für eine ineffektive Bearbeitung der Kanäle mit vielen verschiedenen Systemen und Techniken sehen Siqueira et al. (1997) in Variationen der Anatomie der Wurzelkanäle. Isthmen und Verengungen, welche bei fast allen Wurzeln vorkommen, enthielten verbleibendes Gewebe, welches während der Aufbereitung mit den verschiedenen getesteten Techniken nicht entfernt wurde. Idealerweise sollte die Wurzelkanalpräparation auf jedem Level des Kanals exakt der horizontalen Kontur der Wurzelaussenseite folgen. In dieser idealen Konstitution könnten besonders länglich ovale und abgeflachte Kanäle sauber aufbereitet und gereinigt werden. Diese ideale Präparation würde mit einem minimalen Risiko von Wurzelschwächung oder Perforation des Kanals einhergehen (Jou et al. 2004). Generell kann mit Handinstrumenten entweder in einer feilenden oder in einer reibenden Bewegung gearbeitet werden (Rollison et al. 2002). Wu und Wesselink (2001) zeigten, dass die Präparation von ovalen Wurzelkanälen in Unterkiefer-Frontzähnen mit der balanced force-Technik in 65% der Kanäle nicht instrumentierte Recessus hinterließen. Zu einem späteren Zeitpunkt verglichen Wu et al. (2003) den Abtrag der inneren Dentinschicht in ovalen Kanälen mit zwei verschiedenen Handaufbereitungstechniken. Die balanced force-Technik entfernte 38.6 % von der inneren Dentinschicht der gesamten Kanalinnenwand, wobei mit zirkumferenten Feilen 57.7 % entfernt werden konnte. Diese Differenz war jedoch nicht statistisch signifikant ($p = 0.101$). In ovalen Kanälen hinterließen beide Methoden einen großen

Anteil der Kanalwand unbearbeitet. Abgesehen davon ist bis heute die klinische Tragweite dieser Beobachtung nicht bekannt. Es gibt keine klinischen Daten, ob eine Technik, die 60% der Oberfläche entfernt, zu einer höheren Erfolgsrate führt als eine Technik, die nur 40 % der Oberfläche bearbeitet.

Verschiedene Autoren zeigten, dass die manuelle Crown-down-Technik wirksamer in der Reinigung von ovalen Wurzelkanälen als das Arbeiten mit rotierenden NiTi-Instrumenten ist, obwohl keine der beiden Techniken den Wurzelkanal vollständig reinigen konnten (Barbizam et al. 2002, Schäfer und Lohmann 2002, Ahlquist et al. 2001). Dalton et al. (1998) konnten beim Vergleich von Hand- und maschineller Aufbereitung keinen signifikanten Unterschied bezüglich dem Entfernen von Mikroorganismen aus dem Wurzelkanal feststellen.

3.2.2 Zirkumferentes Feilen mit Handinstrumenten

Die bekannteste Technik, um ovale Wurzelkanäle aufzubereiten, ist das zirkumferente Feilen mit Hedstroem-Feilen oder auch mit rotierenden Instrumenten. Dabei wird die Feile in den Kanal bis zur Arbeitslänge eingeführt und an der Wand schabend zurückgezogen. Dieser Vorgang wird wiederholt, während das Instrument mit Druck entlang der Wand im Kreis herumgeführt wird (Weiger et al. 2002).

Das zirkumferente Feilen mit konventionellen Handfeilen wird besonders empfohlen für die Aufbereitung von Recessus, die während der Wurzelkanalpräparation mit Instrumenten in rotierender Bewegung nicht bearbeitet wurden (Weiger et al. 2002).

Im koronalen Kanalanteil sollen die bukkalen und lingualen Ausläufer ovaler Wurzelkanäle mit Gates-Glidden-Bohrern erweitert werden. Weiter apikal gelingt die Präparation der Ausläufer besser mit Hedstroem-Feilen aus Edelstahl, die beim Bearbeiten in die Ausläufer hinein dirigiert werden sollen.

Im Vergleich zur balanced force-Technik konnte bei ovalen Kanälen mit der Technik des zirkumferenten Feilens mehr die innere Dentischicht von der Kanalwand entfernt werden (Wu et al. 2003). Der Unterschied war jedoch nicht signifikant. Verschiedene Studien zeigen, dass auch die Technik des zirkumferenten Feilens bei weitem nicht die gesamte Oberfläche der Kanalwand bearbeiten kann (Evans et al. 2001, Siqueira et al. 1997).

In den meisten Fällen sind auch kleine Feilen im Querschnitt zu gross, um die dünnen Ausläufer zu bearbeiten. Zudem ist es schwierig, die Instrumente selektiv gegen bestimmte Bereiche der Kanalwände gezielt einzusetzen (Grande et al. 2007). Im apikalen Anteil der Wurzelkanäle der meisten Zähne ist es technisch nicht möglich, eine Kontrolle über die Feile zu haben und sie systematisch gegen die Wände in alle Richtungen zu drücken (Dalton et al. 1998). Theoretisch sollten unregelmäßige Kanalquerschnitte mit Aussparungen und Recessus durch eine feilende Bewegung vollständiger aufbereitet werden als mit rein rotierenden Bewegungen; leider führt das zirkumferente Feilen nicht zu einer signifikanten Erhöhung der bearbeiteten Kanalwände. Im Gegenteil, in einigen Fällen führt es zu einem unerwünscht höheren Dentinabtrag in gefährdeten Zonen und zu Kanalverlagerungen (Peters 2004).

3.2.3 Maschinelle Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten

Nach mehr als 20 Jahren Entwicklung von rotierenden NiTi-Instrumenten zur Wurzelkanalaufbereitung ist eine zunehmende Anwendung von maschinenangetriebenen und rotierenden Aufbereitungsinstrumenten zu verzeichnen. Obwohl das manuelle Instrumentieren immer noch die am weitesten verbreitete Art der Aufbereitung von Wurzelkanälen ist, verwenden die meisten Spezialisten und eine wachsende Zahl von Allgemeinzahnärzten rotierende NiTi-Instrumente. Viele Studien berichten, dass die Aufbereitung durch rotierende NiTi-Instrumente deutlich einfacher und schneller geschieht (Sonntag et al. 2003, Lussi et al. 1999, Esposito und Cunningham 1995). Obwohl einer der Hauptgründe für die Verwendung rotierender NiTi-Instrumenten der Wunsch nach einer kürzeren Aufbereitungszeit ist, bringen diese Instrumente eine Vielzahl von weiteren Vorteilen mit sich (Haapasalo et al. 2005).

Mehrere Untersuchungen haben gezeigt, dass verschiedene NiTi-Systeme die ursprüngliche Krümmung des Kanals besser beibehalten als Handinstrumente aus Edelstahl, insbesondere im apikalen Teil des Wurzelkanals (Schäfer und Lohmann 2002, Versümer et al. 2002, Thompson und Dummer 1997a, Thompson und Dummer 1997b). NiTi-Instrumente haben eine 2-3 fach höhere elastische Flexibilität und eine höhere Resistenz gegenüber Torsionsfrakturen als konventionelle Handinstrumente. Diese Instrumente können sehr gut eingesetzt werden um gekrümmte Wurzelkanäle aufzubereiten (Walia et al. 1988). Präparationsfehler durch Begradigung des Kanals, wie zum Beispiel eine Strip-Perforation konnten mit rotierenden Instrumenten signifikant weniger beobachtet werden als bei der manuellen Bearbeitung. Die Strip-Perforation kann in gekrümmten Kanalsystemen durch vermehrten Materialabtrag mit einem starren Instrument im Bereich der Innenkurvatur entstehen (Sonntag et al. 2003).

Die rotierende Bewegung, die Superelastizität und die selbstzentrierende Eigenschaft dieser Instrumente führt zu einer nicht selektiven Schneideaktion entlang der Dentinwände (Peters 2004). Anstelle einer anatomisch gerechten Aufbereitung führt dies zu einem aufbereiteten Kanal, der dieselbe Form hat wie das Instrument: eine kegelförmige Erweiterung mit einer kreisförmigen Basis (Barbizam et al. 2002, Rödiger et al. 2002, Weiger et al. 2002, Wu und Wesselink 2001). Diese Form entspricht nicht der anatomischen Vorgabe eines zum Beispiel ovalen Kanals.

Bei Zähnen mit einer nicht runden Anatomie ist es vorzuziehen, eine Aufbereitungstechnik zu verwenden, die in der Lage ist, die ursprüngliche Anatomie des Wurzelkanals beizubehalten und eine maximale Dicke an Dentin zu erhalten.

Rotierende Instrumente mit einer sehr großen Konizität, wie zum Beispiel das ProTaper-System zeigten eine größere Effizienz in der Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle als NiTi-Handfeilen. In einigen Fällen geschah dies aber auf Kosten der verbleibenden Dentinwandstärke (Elayouti et al. 2008).

Peters et al. (2001a) untersuchten den Effekt von vier verschiedenen Präparationstechniken auf die Kanalgeometrie. Zwar waren alle präparierten Kanäle runder und hatten einen größeren Durchmesser; jedoch blieben bei allen Instrumentationstechniken 35% oder mehr der Oberfläche unbearbeitet. Es zeigte sich, dass es nur kleine Unterschiede zwischen den einzelnen Präparationstechniken gab. Viel größer war der Einfluss der präoperativen Kanalgeometrie auf das Resultat.

3.2.4 Zirkumferentes Feilen mit NiTi-Instrumenten

Weiger et al. (2002) verglichen in einer In-vitro-Studie die Effizienz zwischen rotierenden Hero-Instrumenten und dem zirkumferenten Feilen mit Hedstroem-Feilen im Hinblick auf die Entfernung der inneren Dentinschicht ovaler Kanäle. Sie konnten keinen statistisch signifikanten Unterschied zeigen. Zudem konnte weder mit rotierenden Instrumenten noch durch zirkumferentes Feilen mit konventionellen Feilen die gesamte Fläche der ovalen Wurzelkanälen bearbeitet werden. Die Ergebnisse zeigten, dass rotierende Instrumente die klassischen Hedstroem-Feilen auch beim zirkumferenten Bearbeiten von ovalen Kanälen ersetzen könnten.

Beim Vergleich verschiedener Arbeitsweisen mit dem gleichen Instrument konnte gezeigt werden, dass die Verwendung einer zirkumferenten Arbeitsweise mit rotierenden Instrumenten bessere Resultate bei der Entfernung der inneren Dentinschicht erzielte als eine rein rotierende Bewegung (Clauder und Baumann 2004, Weiger et al. 2002).

Die zirkumferente Instrumentierung mit rotierenden NiTi-Instrumenten hat allerdings Limitationen. Mit NiTi-Instrumenten gelingt die Präparation ovaler Kanäle nicht zufriedenstellend, weil die sie zu flexibel sind und dem vom Zahnarzt ausgeübten Druck auf das Winkelstück / Instrument an der Instrumentenspitze nicht unbedingt folgen. Die Superelastizität der NiTi-Instrumente erlaubt keine kontrollierte Präparation der bukkalen und lingualen Extensionen der ovalen Kanäle.

In ovalen Kanälen produzierten die Instrumente häufig eine zirkuläre Ausbuchtung, während die bukkale und linguale Extension unbearbeitet und mit Debris und Smear layer gefüllt blieben (Barbizam et al. 2002, Rödiger et al. 2002, Wu et al. 2000a). Mit Instrumenten größerer Konizität (4% oder mehr) konnten die lateralen Extensionen besser aufbereitet werden. Dies lässt sich möglicherweise dadurch erklären, dass diese Instrumente rigider waren und somit mehr zu einer lateralen Schneideeffizienz beitrugen (Elayouti et al. 2008).

Bisher liegen keine Erkenntnisse vor, ob die rotierende NiTi-Instrumentierung mit hohem lateralen Kraftaufwand sicher ist (Grande et al. 2007). Von einer zu grossen Kraftanwendung während der Präparation wird von verschiedenen Herstellern abgeraten. Sie könnte zu einer Instrumentenfraktur führen und somit einen Erfolg der Wurzelbehandlung gefährden.

3.3 Alternative Techniken zur Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle

Zur Entfernung der Gewebereste aus den Extensionen ovaler Kanälen empfiehlt sich unter anderem die mit Ultraschall unterstützte Spülung, bei der die eingespannten Instrumente in die Ausläufer hinein dirigiert werden können (Lumley et al. 1993).

Die Effektivität der Reinigung mit der Ultraschall-Technik soll auf den Phänomenen der Kavitation und der akustischen Strömung basieren (Ahmad et al. 1987, Martin 1976). Allerdings konnten zwischen der Ultraschall unterstützten und der maschinell rotierenden Aufbereitung in verschiedenen Studien keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Effektivität bei der Reinigung von Wurzelkanälen gezeigt werden (Siqueira et al. 1997, Walker und del Rio 1989).

Der Grund dafür könnte sein, dass ein Kavitationseffekt in einem abgeschlossenen Raum wie in einem Wurzelkanal unwahrscheinlich ist, wenn die Feile mit der Kanalwand in Kontakt steht und somit in ihrer Schwingung und Auslenkung gedämpft wird (Siqueira et al. 1997). Um einen Kavitationseffekt sicherzustellen, sollte die Feile mit einer Auslenkungsamplitude von mindestens 135 µm vibrieren. In einer klinischen Situation dürfte dies schwierig zu erreichen sein, da Wurzelkanäle meist gekrümmt sind und die Feile somit an mehreren Punkten mit der Kanalwand in Berührung steht (Ahmad et al. 1988). Sofern aber ein größerer Kontakt zwischen Feile und Dentinwand vermieden werden kann, kann eine akustische Strömung möglicherweise in Wurzelkanälen auftreten (Ahmad et al. 1992).

Burleson et al. (2007) verglichen in einer In-vivo-Studie die Effizienz der Kanalreinigung zwischen einer Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten oder Handinstrumenten und einer Aufbereitung mit NiTi-Instrumenten oder Handinstrumenten mit einer zusätzlichen mit Ultraschall unterstützten Spülung für eine Minute. Sie konnten zeigen, dass die zusätzliche Anwendung von Ultraschallinstrumenten zu einer Verbesserung der Kanalreinigung in allen Bereichen des Kanals führte.

3.4 In der Studie verwendete Techniken

3.4.1 Das ProTaper-System

Seit der Einführung des ersten rotierenden NiTi-Instruments für die Wurzelkanalaufbereitung wurde eine breite Palette von neuen Systemen auf dem Markt etabliert. Das ProTaper-System (Dentsply/Maillefer, Ballaigues, Switzerland) repräsentierte eine neue Generation von derzeit verfügbaren NiTi-Instrumenten (Clauder und Baumann 2004). Es wurde von einer Gruppe angesehener Endodontologen (Prof. Pierre Machtou, Université Paris, France; Dr. Clifford Ruddell, Santa Barbara, California, USA; Prof. John West, Seattle, USA) in Zusammenarbeit mit der Firma Dentsply/Maillefer entwickelt und erstmals 2001 vorgestellt.

Die NiTi-ProTaper-Instrumente wurden entwickelt, um die Präparation von schwierigen, verengten und gekrümmten Kanälen zu vereinfachen (Clauder und Baumann 2004).

Das System besteht aus acht Instrumenten mit einer progressiven Konizität (im englischen progressive taper, daher der Name ProTaper): Drei Feilen für das Crown-down-Verfahren (Shaper SX, S1, S2) und fünf Feilen für die apikale Präparation (Finisher F1, F2, F3, F4, F5) (Abb.3.4).



Abb. 3.4: Die ProTaper-Feilen SX, S1, S2, F1, F2, F4 und F5

Die drei Shaper weisen zum Schaft hin eine zunehmende Konizität über die gesamte Länge ihrer Schneidfläche auf, was eine kontrollierte Präparation des mittleren und

koronalen Abschnittes des zu instrumentierenden Wurzelkanals ermöglicht. Sie ermöglichen den Finishern einen spannungsfreien Zugang zum apikalen Drittel, welches von diesen bearbeitet wird. Die Finisher haben verschiedene Durchmesser an der Instrumentenspitze (0.20 mm, 0.25 mm, 0.30 mm, 0.40 mm, 0.50 mm) und eine gleichbleibende Konizität über die drei apikalen Millimeter (Ruddle 2001). Zum Schaft hin nimmt die Konizität wieder ab.

Eine der herausragenden Innovationen ist die variierende Konizität innerhalb des Arbeitsteils einer Feile. Andere Feilensysteme mit konstanter Konizität kombinieren die Anwendung mehrerer Feilen, um dieselbe Wirkung zu erzielen. ProTaper-Instrumente weisen innerhalb des Arbeitsteils Konizitäten von 3.5 bis 19% auf. Dadurch wird es möglich, nur einen Abschnitt des gesamten Wurzelkanals mit einem Instrument zu bearbeiten. Es wirken wesentlich geringere Kräfte auf das Instrument, die Torquelast wird gering gehalten und die Schneideeffizienz nimmt zu. Im Vergleich zu anderen Feilensystemen weisen ProTaper-Instrumente anstelle einer U-Form einen konvexen dreieckigen Querschnitt auf (Clauder und Baumann 2004). Dieses Instrumentendesign erlaubt eine aktivere Schneideleistung (Abb. 3.5). Außerdem erhalten diese Instrumente durch ihr Profil eine größere Querschnittsfläche und somit einen massiveren Instrumentenkern als passiv schneidende NiTi-Feilen. Dadurch wird das Material bei Torsionsbelastung einem geringeren Stress ausgesetzt als bei Instrumenten mit einem grazilen Kern. Allerdings werden die ProTaper-Feilen durch den massiveren Instrumentenkern steifer und weniger flexibel. Bei der Präparation eines gekrümmten Kanals kann die ursprüngliche Form weniger gut beibehalten werden, da das Instrument im Kanal die Tendenz hat, sich wieder in seine ursprüngliche gerade Form zurückzubiegen (Sonntag 2003).

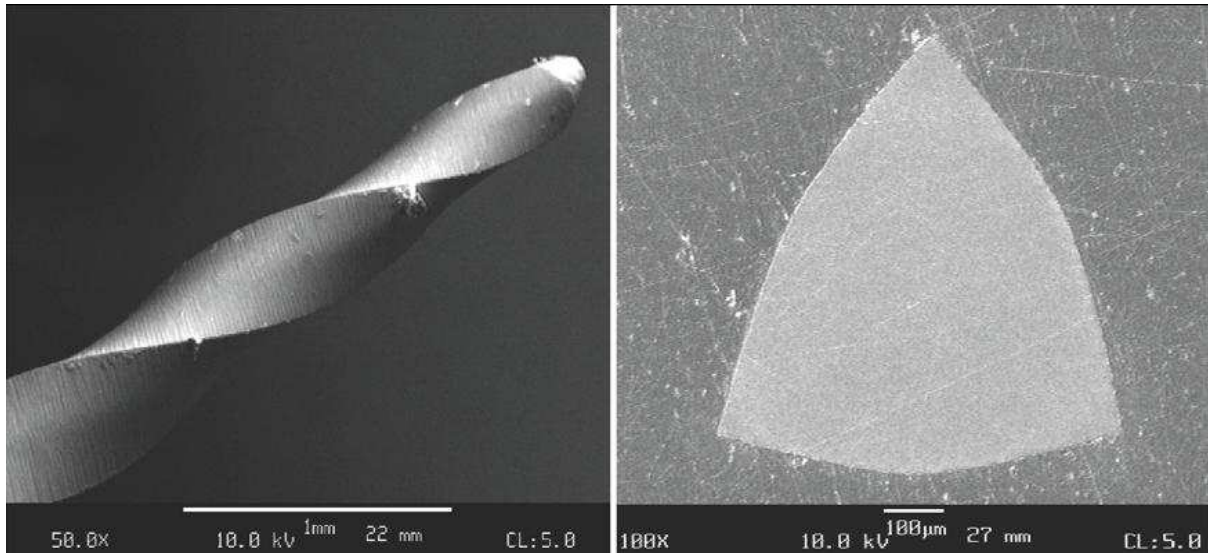


Abb. 3.5: Rasterelektronenmikroskopische (REM)-Abbildung der Instrumentenspitze eines ProTaper-Instrumentes (50fache Vergrößerung) und REM-Abbildung des Querschnittes eines ProTaper-Instrumentes (100fache Vergrößerung)

Das Instrumentendesign:

Alle ProTaper-Shapingfeilen haben eine progressiv zunehmende Konizität. Die SX Feile hat den höchsten Zuwachs an Konizität innerhalb der Feile. Das komplexe Design der SX Feile ermöglicht eine optimale und effiziente Gestaltung der koronalen Aspekte des Wurzelkanals. Dentinüberhänge am Kanaleingang können gezielt abgetragen werden, was zu einem geradlinigen Zugang zu den Wurzelkanälen führt. Das Instrument wird mit einer bürstenden Bewegung eingesetzt und soll den Gates-Glidden-Bohrer ersetzen.

Die Shaping Feilen S1 und S2 haben auch eine zunehmende Konizität über den gesamten Arbeitsbereich, obwohl der Anstieg nicht so stark wie bei der Feile SX ist. Der Durchmesser der Instrumentenspitze der Feile S1 und S2 ist 0.19 mm bzw. 0.20 mm. Das Instrumente S1 soll hauptsächlich den koronalen Abschnitt des Wurzelkanals ausformen, während das Instrument S2 den mittleren Abschnitt des Wurzelkanalsystems bearbeiten soll.

Die Finishing Feilen F1, F2, F3, F4 und F5 haben einen Durchmesser von 0.20 mm, 0.25 mm, 0.30 mm, 0.40 mm und 0.50 mm an der Instrumentenspitze. Alle fünf Instrumente haben eine gleichbleibende Konizität in den ersten 3 mm. Feile F1 hat eine Konizität von 7%, Feile F2 eine Konizität von 8% und Feile F3 eine Konizität von 9% in diesem Bereich. Die Feilen F4 und F5 haben eine Konizität von 6 bzw. 5%. Über die verbleibende Länge der Schneide kann ein umgekehrter Kegel gefunden werden. Die abnehmende Konizität verhindert einen zu großen Durchmesser im

Schaftbereich des Instruments und sorgt für eine anhaltende Flexibilität innerhalb der Feile. Die Instrumente sind neben der Gestaltung des Mittelteils vor allem für die apikale Präparation entwickelt worden.

Arbeiten mit ProTaper

Um das Risiko einer Instrumentenfraktur möglichst gering zu halten wird die Verwendung eines Drehmoment-kontrollierenden Endo-Mikromotors empfohlen (Yared et al. 2002, Yared et al. 2001). Die Feile wird ohne Kraft angewendet; nur eine leichte bürstende Bewegung soll zur Erreichung der gewünschten Resultate ausgeführt werden.

Eine initiale Sondierung des Wurzelkanals und die Herstellung eines Gleitpfades mit Handinstrumenten aus Edelstahl ist insbesondere für die sichere Anwendung permanent rotierender NiTi-Instrumenten erforderlich (Berutti et al. 2004, Yared et al. 2001).

Nachdem das ProTaper-System eingeführt wurde, ist über die Möglichkeit diskutiert worden, dass der aktivere Schneideprozess zu einer mehr oder weniger schweren Kanalverlagerung führen könnte. Tatsächlich konnten Mikro-Computertomographie-Studien präparierter Kanäle zeigen, dass das ProTaper-System zu einer leicht größeren Transportation des Kanals führte als Feilensysteme mit einem passiven Schneideprozess (Peters et al. 2003). Eine andere Studie zeigte keine Transportation im mittleren Abschnitt und in apikalen Bereichen des Wurzelkanals, allenfalls nur eine geringe Transportation in den koronalen Kanalabschnitten (Bergmans et al. 2003), Insgesamt wurden bei der Bearbeitung von Wurzelkanälen mit ProTaper sehr viel weniger Präparationsfehler verursacht als bei Verwendung einer standardisierten Instrumentierungstechnik mit Edelstahl-Handinstrumenten (Gluskin et al. 2001). ProTaper Instrumente arbeiten länger in einer superelastischen Phase als Instrumente mit einem U-Feilen-Design. Sie bringen so eine stärkere Leistung und eine geringeres Frakturrisiko (Berutti et al. 2003).

3.4.2 Lösungsansätze für das Bearbeiten ovaler Wurzelkanäle mit ProTaper-Instrumenten

Die Ergebnisse vieler Studien zeigten, dass keine der am häufigsten verwendeten Aufbereitungstechniken ovale Kanäle vollständig reinigen konnte (Barbizam et al. 2002, Hülsmann et al. 1997, Valli et al. 1996). Deshalb sollten alternative Instrumentierungstechniken zur Aufbereitung ovaler Wurzelkanäle erarbeitet werden. Es könnten zum Beispiel rotierende NiTi-Systeme und konventionelle Handfeilen kombiniert werden. Mit dem rotierenden ProTaper-System würde der Kanal initial aufbereitet. Dabei entsteht zentral im Kanal eine kegelförmige Erweiterung mit einer kreisförmigen Basis. Diese initiale Erweiterung des Kanals ermöglicht einem hohen Volumen von Spüllösung bereits bis in das apikale Drittel des Kanals zu gelangen, was für eine erfolgreiche Reinigung des Wurzelkanals entscheidend sein kann (Ram 1977). Solange sich die infektiösen Mikroorganismen im Hauptkanal befinden, können sie direkt durch Instrumentation und Spülung entfernt werden. Mit Hedstroem-Feilen kann anschliessend versucht werden, die lateralen Extensionen aufzubereiten. Dadurch entsünde eine annähernd anatomisch gerechte Aufbereitung des Kanals. Wegen der Flexibilität und der schwierigen Kontrollierbarkeit des Instruments im Kanal könnte die Reinigung der lateralen Extensionen jedoch unvollständig bleiben. Nachteile wären zudem der erhöhte Zeit- und Materialaufwand, da zwei verschiedene Systeme nacheinander kombiniert werden müssen.

Sanduhrförmige Kanäle werden häufig als zwei getrennte Kanäle betrachtet und auch als solche aufbereitet. Auch ein ovaler Kanal kann wie zwei separate Kanäle aufbereitet werden, wobei die bukkale und linguale Hälfte als ein separater Kanal zur Präparation angesehen werden (Abb. 3.7). Jedes ProTaper-Instrument wird mit Kontakt zur bukkalen oder lingualen Aussenwand in den Kanal eingeführt, sodass zwei unabhängige Präparationen entstehen. Ein leichter lateraler Druck wird während der gesamten Aufbereitung auf das Instrument appliziert. Idealerweise überlappen sich die beiden kreisförmigen Präparationen am Schluss in der Mitte des Kanals. Bei einer allzu hohen Diskrepanz zwischen dem größeren und kleineren Durchmesser eines länglich ovalen Kanals kann dieses Ziel unter Umständen nicht erreicht werden ohne die Wurzel durch eine zu große Präparation zu schwächen.

Zudem könnten die NiTi-Instrumente zu flexibel sein und keine kontrollierte Präparation der bukkalen und lingualen Extensionen der ovalen Kanäle erlauben.

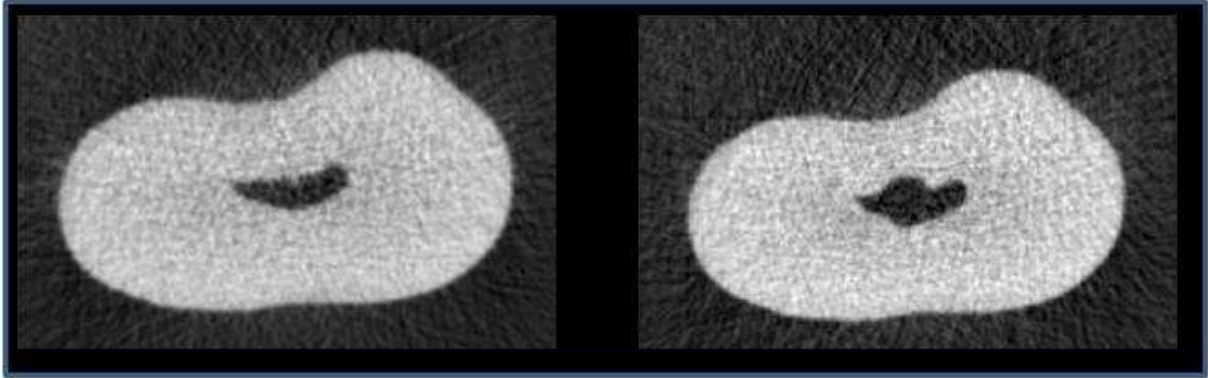


Abb 3.6: Querschnitt eines Wurzelkanals vor und nach der Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten. Der Kanal wurde wie ein einzelner Kanal aufbereitet. Die lateralen Recessus blieben unbearbeitet.

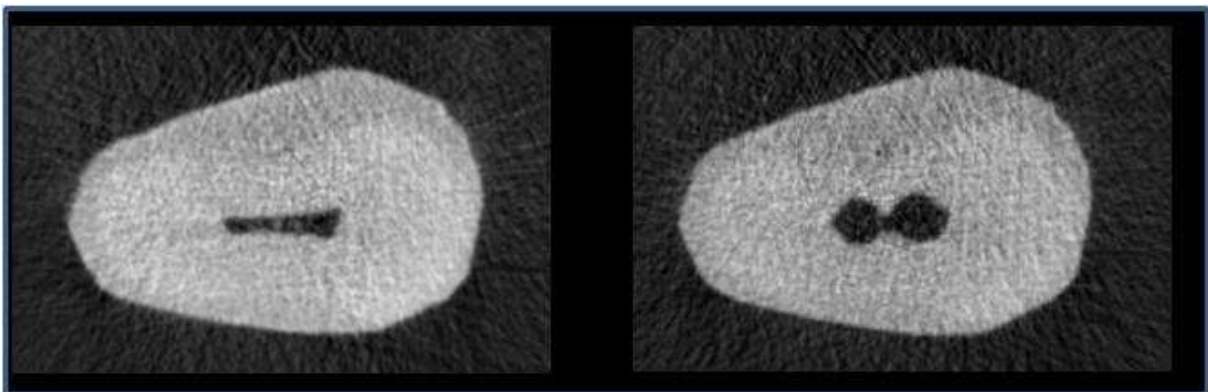
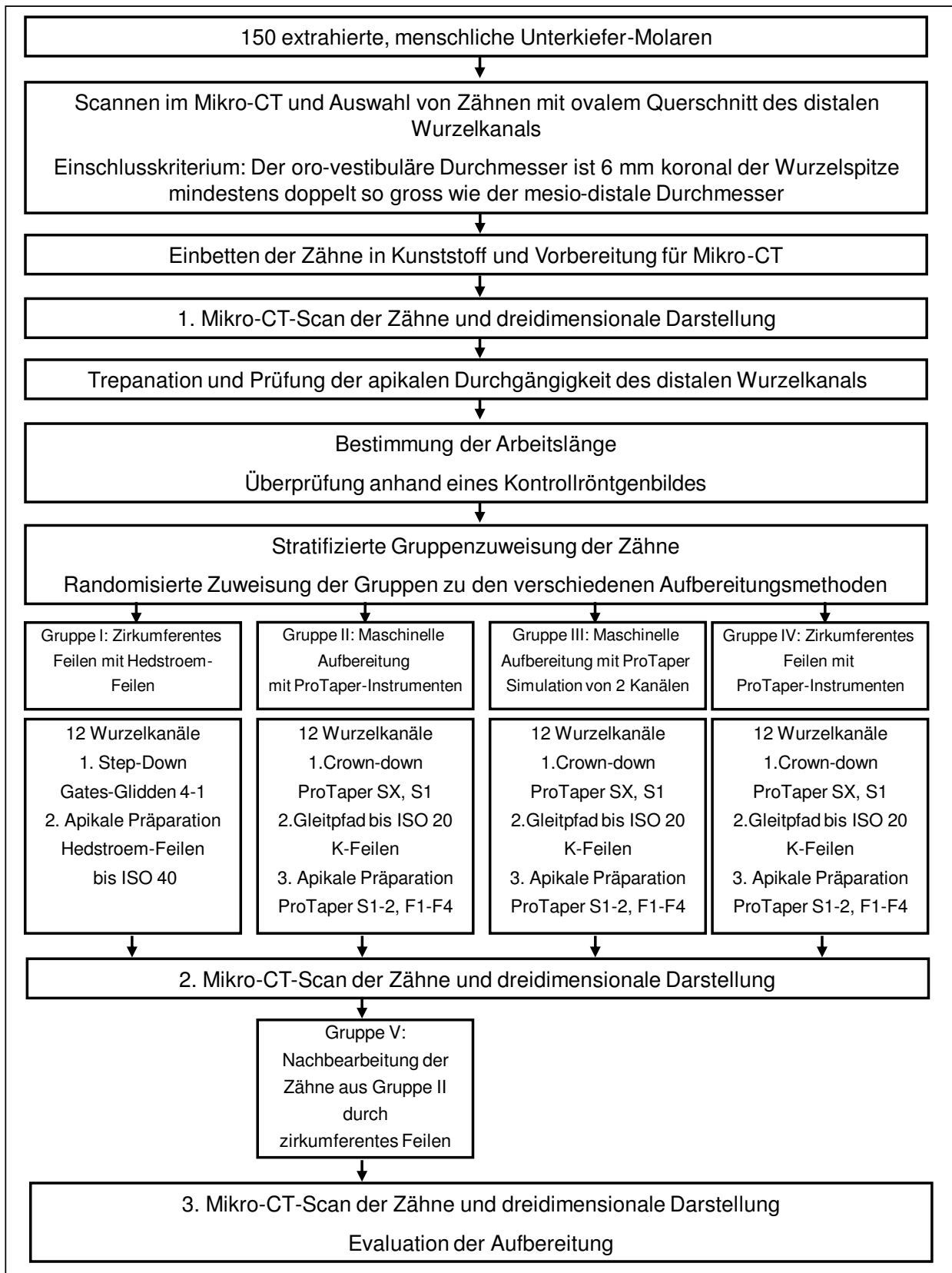


Abb. 3.7: Querschnitt eines Wurzelkanals vor und nach der Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten. Der Kanal wurde aufbereitet, als wären es zwei getrennte Kanäle.

4 Versuchsplanung



5 Material und Methode

5.1 Versuchsvorbereitung

5.1.1 Auswahl der Zähne

In verschiedenen Zahnarztpraxen der Region Zürich wurden insgesamt 150 extrahierte Unterkiefer-Molaren mit intakter, distaler Wurzel gesammelt. Die Zähne wurden direkt nach der Extraktion bis zum Versuchsende in einer 0.1%iger Thymol-Lösung feucht gelagert.

Mit einem Mikro-Computertomographen (μ CT20, Scanco Medical, Brüttisellen, Schweiz) wurden alle Zähne mit geringer Auflösung gescannt und dreidimensional dargestellt (Software IPL V5.06B, Scanco Medical). Für den weiteren Verlauf der Studie wurden nur diejenigen Zähne berücksichtigt, die eine distale Wurzel mit einem Wurzelkanal mit ovalem Querschnitt aufwiesen. Der Wurzelkanal wurde anhand der Schnittbilder („cross-sections“) 6 mm koronal der Wurzelspitze vermessen. Als Einschlusskriterium wurde festgelegt, dass nur Zähne in die Studie aufgenommen werden, deren distaler Wurzelkanal an dieser Stelle in oro-vestibulärer Richtung einen mindestens doppelt so grossen Durchmesser wie den mesio-distalen Durchmesser aufwiesen.

5.1.2 Einbetten der Zähne

Die äußere Zahnoberfläche wurde mit zwei verschiedenen Scalern (Handscaler ZI 11 und M 23, Deppeler SA, Rolle, Schweiz) von parodontalem Gewebe befreit und gereinigt. Danach wurden die Zähne mit Epoxidharz (Stycast 1266 Part A und B, Emerson & Cuming, Westerlo, Belgien) in einem Sockelformer eingebettet und auf einen Probenträger (REM Probenträger, Laubscher, Täuffelen, Schweiz) fixiert (Abb. 5.1 und 5.2). Um später eine visuelle Überprüfung der Arbeitslänge und der Durchgängigkeit des Wurzelkanals zu ermöglichen, wurden die apikalen vier Millimeter nicht im Epoxidharz eingebettet.

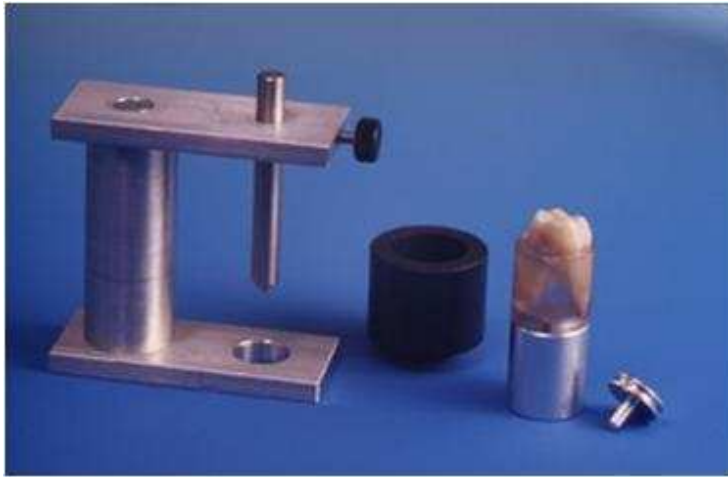


Abb. 5.1: Vorrichtung zum Einbetten der Zähne



Abb. 5.2: Eingebetteter Zahn

5.1.3 Mikro-Computertomographie

Die insgesamt 53 verbliebenen Zähne wurden nun hochauflösend mit einem Mikro-Computertomographen (μ CT20, Scanco Medical) bei 50 kV und 160 μ A gescannt. Dies ermöglichte eine räumliche Darstellung der Zähne in einer Auflösung von 34 μ m großen Voxeln und einer Bildmatrix von 1024^2 Pixeln. Die Schichtdicke betrug 34 μ m. Bei einer durchschnittlichen Scandauer von 68 Sekunden pro Schnitt und circa 700 Schnitten pro Zahn dauerte dieser Vorgang zum Teil über 13 Stunden. Diese präoperativen Datensätze wurden für die Zuteilung der Zähne auf die experimentellen Gruppen verwendet (siehe Kap. 5.1.5).

5.1.4 Bestimmung der Arbeitslänge

Das Pulpakavum wurde mit einem Präparierdiamanten (80 μ m, FG 8514, Intensiv SA, Grancia, Schweiz) eröffnet. Mit einem Rosenbohrer (Dentsply Maillefer, Ballaigues, Schweiz) wurde dann das Pulpakammerdach von zentral nach peripher abgetragen. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Kanaleingänge nicht bearbeitet wurden und unverändert blieben. Die Kavitäten wurden nach der Präparation mit einer 1%igen Natriumhypochlorit (NaOCl)-Lösung (Kantonsapotheke, Zürich, Schweiz) gespült.

Anschließend wurde die apikale Durchgängigkeit der distalen Kanäle überprüft. Dazu wurde eine ISO 08 K-Feile (Dentsply Maillefer) so lange in den Wurzelkanal nach apikal eingebracht, bis ihre Spitze gerade sichtbar wurde. Die Länge der Feile wurde

bis zu einem reproduzierbaren koronalen Referenzpunkt gemessen und nach Subtraktion von einem Millimeter als Arbeitslänge definiert. Bei fünf Zähnen konnte keine apikale Durchgängigkeit erreicht werden. Diese wurden aus der Untersuchung ausgeschlossen. Abschließend wurde zur Kontrolle ein digitales Röntgenbild (Digora, Soredent, Helsinki, Finnland) mit auf ermittelter Arbeitslänge eingeführter ISO 15 K-Feile (Dentsply Maillefer) hergestellt.

5.1.5 Gruppenzuweisung der Zähne

Anhand der Daten des ersten hochauflösenden Scans wurden die Kanäle drei, sechs und neun Millimeter koronal der Wurzelspitze in oro-vestibulärer und mesio-distaler Richtung vermessen. Die Werte wurden notiert und die Querschnittsform der Kanäle (oval oder rund) beschrieben. Schließlich wurde das Verhältnis der oro-vestibulären zur mesio-distalen Ausdehnung berechnet.

Als relevanter Wert für die Gruppenzuweisung wurde das Verhältnis der Kanalausdehnungen sechs Millimeter koronal des Apex gewählt. Die verbliebenen 48 Zähne wurden stratifiziert in einer absteigenden Reihe auf vier Gruppen aufgeteilt. Der Mittelwert der Verhältnisse der oro-vestibulären zur mesio-distalen Ausdehnung war in allen vier Gruppen 3.9. Daraufhin wurden die einzelnen Gruppen randomisiert den verschiedenen Aufbereitungsarten zugewiesen (www.random.org).

5.2 Aufbereitung der Zähne

5.2.1 Vorversuch

Um mit den ProTaper-Instrumenten vertraut zu werden, wurden die mesialen Kanäle von 10 Molaren zur Übung aufbereitet. Als Antriebsquelle zur maschinellen Aufbereitung wurde während des Vorversuches und während des gesamten Versuches ein Endo-Mikromotor verwendet (ATR Tecnika Vision, Dentsply Maillefer). Bei diesem Motor lassen sich, je nach verwendetem Instrument, individuell die Drehzahl und das maximale Drehmoment einstellen. Um überlastungsbedingte Feilenbrüche weitgehend auszuschließen setzt der Motor automatisch eine kurze Drehrichtungsumkehr in Kraft, sobald das Instrument im Wurzelkanal verblockt und die Belastungsgrenze des Instrumentes annähernd erreicht ist. In dieser

Untersuchung wurde ein Endo-Winkelstück mit einer Untersetzung von 16:1 verwendet.

5.2.2 Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Die Versuchsgruppe I wurde der manuellen Aufbereitung mit zirkumferenten Feilen zugewiesen. Bei der zirkumferenten Technik wurde das verwendete Instrument im Kreis entlang der Wände des ovalen Kanals ziehend-schabend bewegt, um eine möglichst große Fläche mechanisch aufzubereiten. Es wurden jeweils drei Umgänge pro Instrument durchgeführt.

Zuerst wurden die koronalen drei Millimeter des distalen Kanals mit Gates-Glidden-Bohrern (Dentsply Maillefer) zirkumferent erweitert. Je nach Größe des Kanaleinganges wurden dazu in absteigender Reihenfolge die Größen 4 bis 2 oder 3 bis 1 verwendet. Anschließend wurde der Kanal mit einer auf Arbeitslänge markierten Spülkanüle und 1 ml 1%iger NaOCl-Lösung gespült.

Eine ISO 15 Hedstroem-Feile (Dentsply Maillefer) wurde auf Arbeitslänge in den Kanal eingeführt und mit ziehend-schabenden Bewegungen wurde der Kanal zirkumferent bearbeitet. Nach jeder Feile wurde mit 1 ml NaOCl gespült und mit einer auf Arbeitslänge plus 1 mm eingestellten ISO 10 K-Feile (sog. „patency Feile“) die apikale Durchgängigkeit des bearbeiteten Kanals überprüft. Diese Sequenz wurde mit Hedstroem-Feilen der ISO Größen 20, 25, 30, 35 und 40 wiederholt. Abschliessend wurde der Kanal mit 5 ml NaOCl gespült.

Die verwendeten Hedstroem-Feilen wurden spätestens nach der Bearbeitung von sechs Kanälen ausgewechselt.

5.2.3 Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten

Die Wurzelkanäle wurden maschinell mit ProTaper-Feilen (Dentsply Maillefer) aufbereitet. Die Instrumente wurden jeweils am Ort des geringsten Widerstandes in den Kanal eingeführt. Während der Aufbereitung wurde nur ein geringer Druck Richtung apikal, zu keiner Zeit aber ein lateraler Druck angewendet.

Mit ProTaper S1 wurde als erster Schritt ein Crown-down bis $\frac{2}{3}$ der Arbeitslänge durchgeführt. Mit dem Instrument SX wurde der Kanaleingang erweitert und Überhänge beseitigt. Anschließend wurde das Crown-down mit S1 bis $\frac{3}{4}$ der ermittelten Arbeitslänge fortgesetzt. Mit K-Feilen in aufsteigender Größe bis ISO 20 (Dentsply Maillefer) wurde ein Gleitweg vorbereitet. Dann folgte die Instrumentierung des Kanals mit den Instrumenten S1, S2, F1, F2, F3 und F4 bis auf Arbeitslänge. Nach jeder Feile wurde jeweils mit 1 ml NaOCl gespült und die apikale Durchgängigkeit geprüft. Zur abschliessenden Spülung wurden 5 ml NaOCl verwendet.

Alle Feilen wurden spätestens nach sechs Anwendungen ausgewechselt.

5.2.4 Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten unter Simulation von zwei Wurzelkanälen

Auch die Zähne der Gruppe III wurden mit ProTaper-Feilen (Dentsply Maillefer) aufbereitet. Anders als bei der Gruppe II wurde jedes Instrument zweimal in den distalen Kanal eingeführt. Das erste Mal mit leichtem lateralen Druck nach bukkal und das zweite Mal mit leichtem Druck nach lingual. So wurde der ovale Wurzelkanaleingang nach bukkal und lingual erweitert, dass annähernd zwei getrennte Kanaleingänge entstanden und der Kanaleingang einen sanduhrförmigen Umriss erhielt. In der gleichen Reihenfolge wie unter 5.2.3 beschrieben, wurde jedes Instrument einmal im bukkalen Aufbereitungspfad und einmal im lingualen verwendet. Wiederum wurde nach jeder Feile gespült, die Durchgängigkeit geprüft und am Schluss eine gründliche Spülung durchgeführt.

Alle Feilen wurden spätestens nach drei aufbereiteten Kanälen ausgewechselt.

5.2.5 Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper-Instrumenten

Die distalen Kanäle der zwölf Zähne der Gruppe IV wurden maschinell mit ProTaper-Feilen (Dentsply Maillefer) und zirkumferentem Feilen aufbereitet.

Wiederum wurde das Crown-down mit S1 bis $\frac{2}{3}$ der Arbeitslänge durchgeführt. Danach folgten das koronal shaping mit SX und die Fortsetzung des Crown-down mit S1 bis $\frac{3}{4}$ der Arbeitslänge.

Mit K-Feilen in aufsteigender Größe bis ISO 20 (Dentsply Maillefer) wurde ein Gleitweg vorbereitet. Mit einer an den Kanalwänden bürstenden Bewegung wurde der Kanal anschließend mit S1, S2, F1, F2, F3 und F4 zirkumferent bis auf Arbeitslänge bearbeitet. Auch in dieser Versuchsgruppe wurde nach jeder Feile mit 1 ml NaOCl gespült und mit der patency Feile die apikale Durchgängigkeit des bearbeiteten Kanals überprüft. Die Abschlussspülung wurde mit 5 ml NaOCl durchgeführt.

Sämtliche Feilen wurden dreimal zirkumferent im Kanal angewendet und spätestens nach sechs Anwendungen ausgewechselt.

5.3 Zweite hochauflösende Mikro-Computertomographie

Die 48 aufbereiteten Zähne der Gruppen I bis IV wurden ein zweites Mal hochauflösend im Mikro-Computertomographen gescannt. Um einen exakten Vergleich zwischen der Anfangssituation und der Situation nach der Aufbereitung herstellen zu können, wurden die gleichen Einstellungen wie zu Anfang des Experimentes gewählt.

5.4 Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe II durch zirkumferentes Feilen

Die distalen Wurzelkanäle der zwölf Versuchszähne der Gruppe II wurden nun noch weiter bearbeitet. Dazu wurde mit Hedstroem-Feilen der ISO Größen 30, 35 und 40 (Dentsply Maillefer) der bereits mit ProTaper aufbereitete Kanal zirkumferent präpariert. Die Feilen wurden in den bestehenden Aufbereitungspfad eingeführt und mit ziehend-schabenden Bewegungen und lateralem Druck dreimal im Kanal herumgeführt. Auf eine Präparation mit aufsteigender Größe beginnend ab ISO

Größe 15 wurde verzichtet, da dies nicht praxisnah erschien. Nach jeder Feile wurde der Kanal mit 1 ml NaOCl und nach der letzten Feile mit 5 ml gespült.

Abschließend wurden diese zwölf nachbearbeiteten Zähne einem dritten hochauflösenden Scan im Mikro-Computertomographen unterzogen.

5.5 Arbeitsprotokolle

Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Bearbeitung des distalen Kanals:

1. Gates-Glidden-Bohrer (Grösse 4 oder 3) bis 1mm in den Kanal
2. Gates-Glidden-Bohrer (Grösse 3 oder 2) bis 2mm in den Kanal
3. Gates-Glidden-Bohrer (Grösse 2 oder 1) bis 3mm in den Kanal
4. Hedstroem-Feile ISO 15 + patency file (K-Feile ISO 10)
5. Hedstroem-Feile ISO 20 + patency file (K-Feile ISO 10)
6. Hedstroem-Feile ISO 25 + patency file (K-Feile ISO 10)
7. Hedstroem-Feile ISO 30 + patency file (K-Feile ISO 10)
8. Hedstroem-Feile ISO 35 + patency file (K-Feile ISO 10)
9. Hedstroem-Feile ISO 40 + patency file (K-Feile ISO 10)

Alle Feilen wurden zirkumferent im Kanal angewendet.

Nach jeder Feile Spülung mit 1 ml Natriumhypochlorit.

Schluss-spülung mit 5 ml Natriumhypochlorit.

Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten

Bearbeitung des distalen Kanals:

1. S1 bis 2/3 der Arbeitslänge
2. SX
3. S1 bis 3/4 der Arbeitslänge
4. K-Feile ISO 15 (Gleitweg)
5. K-Feile ISO 20 (Gleitweg)
6. S1 + patency file (K-Feile ISO 10)
7. S2 + patency file (K-Feile ISO 10)
8. F1 + patency file (K-Feile ISO 10)
9. F2 + patency file (K-Feile ISO 10)
10. F3 + patency file (K-Feile ISO 10)
11. F4 + patency file (K-Feile ISO 10)

Nach jeder Feile Spülung mit 1 ml Natriumhypochlorit.
Schlusssspülung mit 5 ml Natriumhypochlorit.

Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten unter Simulation von zwei Kanälen

Bearbeitung des distalen Kanals:

- | | | |
|-----|------------------------------------|-------------------|
| 1. | S1 bis 2/3 der Arbeitslänge | (bukkal+ lingual) |
| 2. | SX | (bukkal+ lingual) |
| 3. | S1 bis 3/4 der Arbeitslänge | (bukkal+ lingual) |
| 4. | K-Feile ISO 15 (Gleitweg) | (bukkal+ lingual) |
| 5. | K-Feile ISO 20 (Gleitweg) | (bukkal+ lingual) |
| 6. | S1 + patency file (K-Feile ISO 10) | (bukkal+ lingual) |
| 7. | S2 + patency file (K-Feile ISO 10) | (bukkal+ lingual) |
| 8. | F1 + patency file (K-Feile ISO 10) | (bukkal+ lingual) |
| 9. | F2 + patency file (K-Feile ISO 10) | (bukkal+ lingual) |
| 10. | F3 + patency file (K-Feile ISO 10) | (bukkal+ lingual) |
| 11. | F4 + patency file (K-Feile ISO 10) | (bukkal+ lingual) |

Nach jeder Feile Spülung mit 1 ml Natriumhypochlorit.

Schlusssspülung mit 5 ml Natriumhypochlorit.

Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper-Instrumenten

Bearbeitung des distalen Kanals:

1. S1 bis 2/3 der Arbeitslänge
2. SX
3. S1 bis 3/4 der Arbeitslänge
4. K-Feile ISO 15 (Gleitweg)
5. K-Feile ISO 20 (Gleitweg)
6. S1 + patency file (K-Feile ISO 10)
7. S2 + patency file (K-Feile ISO 10)
8. F1 + patency file (K-Feile ISO 10)
9. F2 + patency file (K-Feile ISO 10)
10. F3 + patency file (K-Feile ISO 10)
11. F4 + patency file (K-Feile ISO 10)

Alle Feilen wurden zirkumferent im Kanal angewendet.

Nach jeder Feile Spülung mit 1 ml Natriumhypochlorit.

Schlusspülung mit 5 ml Natriumhypochlorit.

Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper-Instrumenten + Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe II durch zirkumferentes Feilen

Bearbeitung des distalen Kanals:

1. S1 bis 2/3 der Arbeitslänge
2. SX
3. S1 bis 3/4 der Arbeitslänge
4. K-Feile ISO 15 (Gleitweg)
5. K-Feile ISO 20 (Gleitweg)
6. S1 + patency file (K-Feile ISO 10)
7. S2 + patency file (K-Feile ISO 10)
8. F1 + patency file (K-Feile ISO 10)
9. F2 + patency file (K-Feile ISO 10)
10. F3 + patency file (K-Feile ISO 10)
11. F4 + patency file (K-Feile ISO 10)
12. Mikro-CT-Scan
13. Hedstroem-Feile ISO 30 + patency file (K-Feile ISO 10)
14. Hedstroem-Feile ISO 35 + patency file (K-Feile ISO 10)
15. Hedstroem-Feile ISO 40 + patency file (K-Feile ISO 10)

Die Hedstroem-Feilen wurden zirkumferent im Kanal angewendet.

Nach jeder Feile Spülung mit 1 ml Natriumhypochlorit.

Schlussspülung mit 5 ml Natriumhypochlorit.

5.6 Auswertung der Daten und Statistik

Nach der Rekonstruktion und Segmentierung der Mikro-Computertomographie-Daten der einzelnen Zähne wurden in einem nächsten Schritt die distalen Wurzelkanäle getrennt dargestellt. Die Berechnungen beziehen sich auf die einzelnen Wurzelkanäle im Bereich des apikalen Foramens bis zur Furkation. Die Oberflächen und Volumina der Wurzelkanäle wurden aus triangulierten Daten nach der sog. „Marching Cubes“-Methode (Cline et al. 1988) berechnet. Dabei werden die rekonstruierten Oberflächen mit einem speziellen Gitter überzogen. Diese Methode

erlaubt eine Genauigkeit, die durch den speziellen Algorithmus besser als die nominelle räumliche Auflösung ist (Cline et al. 1988).

Alle Zähne der Gruppen I bis IV wurden zweimal, vor und nach Aufbereitung, eingescannt und die Messungen an jedem Datensatz durchgeführt. Die Ausrichtung der rekonstruierten Darstellungen erfolgte mit einer speziellen Software (IPL Register 1.01beta, Scanco Medical) an der unveränderten Außenkontur der Zähne. Eine frühere Untersuchung zeigte, dass die Ausrichtung der Datensätze mit einer Präzision von weniger als 1 Voxel gelingt (Peters et al. 2000) (IPL V5.06B, Scanco Medical).

Die ermittelten Daten wurden statistisch auf Ihre Verteilung getestet (Shapiro-Wilk-Test) und eine Normalverteilung festgestellt. Die Unterschiede zwischen den experimentellen Gruppen wurden mit der Varianzanalyse ANOVA und anschließende Tukey-Kramer-HSD-Test auf signifikante Unterschiede untersucht. Das Signifikanzniveau wurde auf $p < 0.05$ festgelegt. Als Software wurde das Statistikprogramm JMP (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) verwendet.

6 Resultate

6.1 Vergleich der Daten vor Aufbereitung der Wurzelkanäle

Das Wurzelkanalvolumen und die Oberflächen der Wurzelkanalwände wurden über die gesamte Wurzelkanallänge und in den apikalen vier Millimetern vor der Aufbereitung bestimmt. Der Vergleich dieser Daten vor Aufbereitung der Wurzelkanäle wurde durchgeführt, um die gleichmäßige Verteilung der Zähne auf die Gruppen zu bestätigen. In die Analyse gehen nur die Gruppen I bis IV ein, da die Gruppe V aus einer zusätzlichen Präparation der Zähne aus Gruppe II resultiert.

6.1.1 Vergleich der gesamten Wurzelkanalvolumina

Die Varianzanalyse der Gesamtvolumina der distalen Wurzelkanäle vor Aufbereitung zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede (ANOVA $p = 0.21$). Die Mittelwerte lagen zwischen $6.39 \pm 1.66 \text{ mm}^3$ in Gruppe III und $7.60 \pm 2.53 \text{ mm}^3$ in Gruppe II (Tab. 6.1, Abb. 6.1).

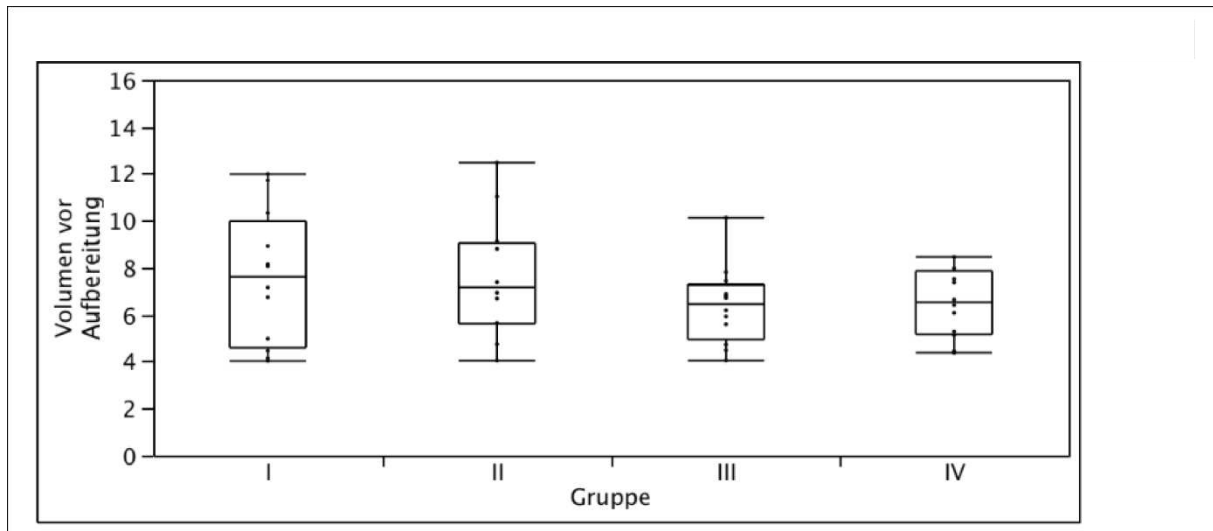


Abb. 6.1: Box-plot-Darstellung der Volumina der Wurzelkanäle vor Aufbereitung [mm³]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an.

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

Volumen der Wurzelkanäle	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV
Vor Aufbereitung	7.56 ± 2.83	7.60 ± 2.53	6.39 ± 1.66	7.16 ± 3.17

Tab. 6.1: Volumina der Wurzelkanäle vor Aufbereitung (Mittelwert \pm Standardabweichung [mm³]).

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

6.1.2 Vergleich der apikalen Wurzelkanalvolumina

Die Varianzanalyse der apikalen Volumina der distalen Wurzelkanäle vor Aufbereitung zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede (ANOVA $p = 0.65$). Die Mittelwerte lagen zwischen $0.82 \pm 0.28 \text{ mm}^3$ in Gruppe III und $1.26 \pm 0.65 \text{ mm}^3$ in Gruppe I (Tab. 6.2, Abb. 6.2).

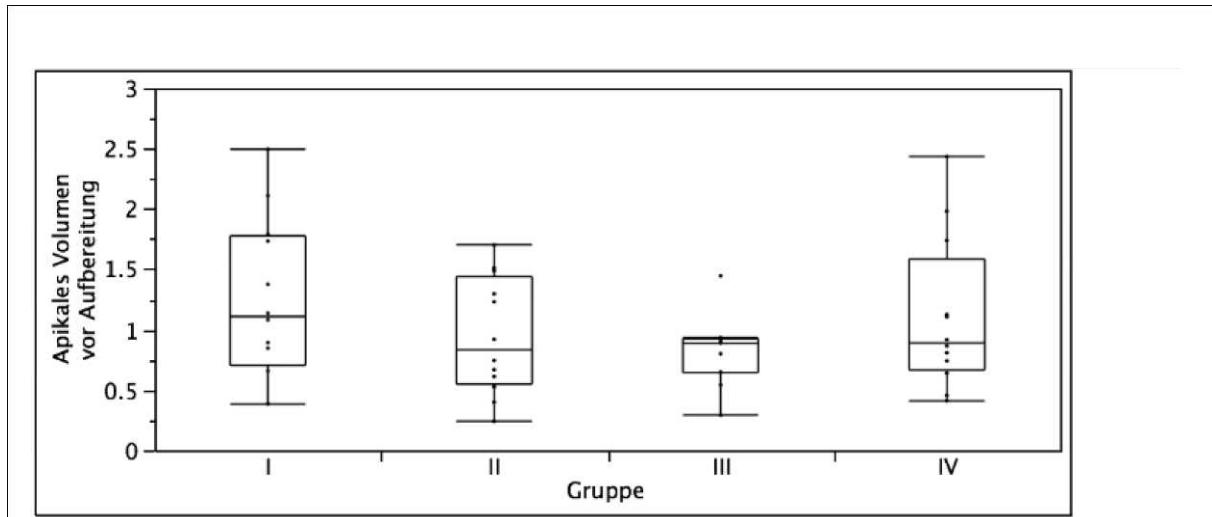


Abb. 6.2: Box-plot-Darstellung der apikalen Volumina der Wurzelkanäle vor Aufbereitung [mm³]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an. Datenpunkt außerhalb dieser Perzentile sind Ausreißer.
 Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen
 Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper
 Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen
 Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

Volumen der Wurzelkanäle	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV
Vor Aufbereitung	1.26 ± 0.65	0.95 ± 0.49	0.82 ± 0.28	1.10 ± 0.63

Tab. 6.2: Apikale Volumina der Wurzelkanäle vor Aufbereitung (Mittelwert \pm Standardabweichung [mm^3]).
 Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen
 Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper
 Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen
 Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

6.1.3 Vergleich der gesamten Wurzelkanaloberflächen

Die Varianzanalyse der Oberflächen der distalen Wurzelkanäle vor Aufbereitung zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede (ANOVA $p = 0.63$). Die Mittelwerte lagen zwischen $37.52 \pm 8.32 \text{ mm}^2$ in Gruppe III und $42.78 \pm 12.61 \text{ mm}^2$ in Gruppe I (Tab. 6.3, Abb. 6.3).

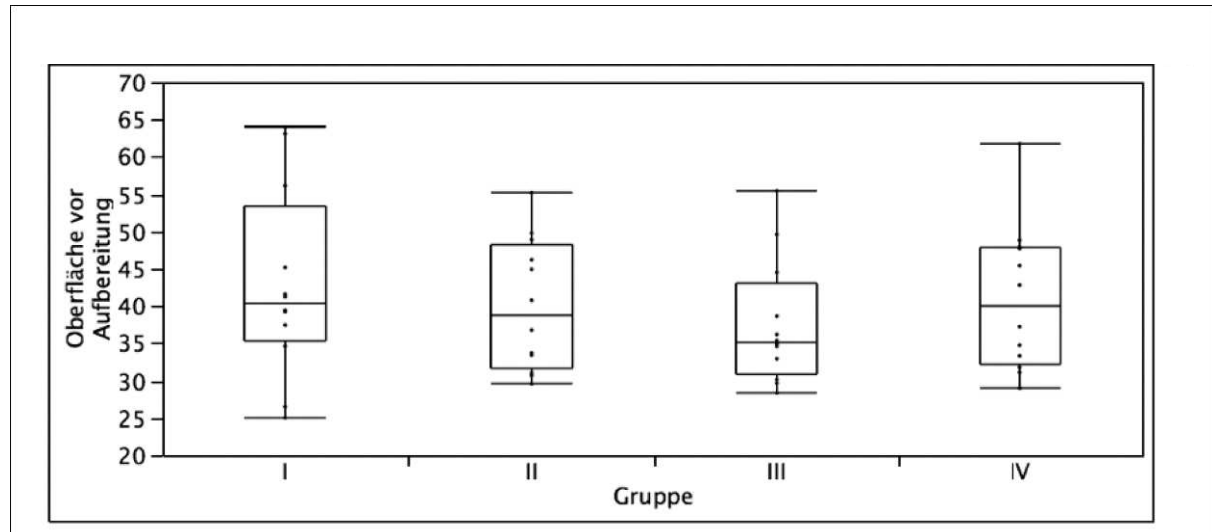


Abb. 6.3: Box-plot-Darstellung der Oberflächen der Wurzelkanäle vor Aufbereitung [mm²]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an.

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

Oberfläche der Wurzelkanäle	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV
Vor Aufbereitung	42.78 ± 12.61	40.08 ± 8.72	37.52 ± 8.32	40.96 ± 9.76

Tab. 6.3: Oberflächen der Wurzelkanäle vor Aufbereitung (Mittelwert \pm Standardabweichung [mm²]).

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

6.1.4 Vergleich der apikalen Wurzelkanaloberflächen

Die Varianzanalyse der apikalen Oberflächen der distalen Wurzelkanäle vor Aufbereitung zeigte keine statistisch signifikanten Unterschiede (ANOVA $p = 0.12$). Die Mittelwerte lagen zwischen $7.27 \pm 1.66 \text{ mm}^2$ in Gruppe III und $9.68 \pm 3.26 \text{ mm}^2$ in Gruppe I (Tab. 6.4, Abb. 6.4).

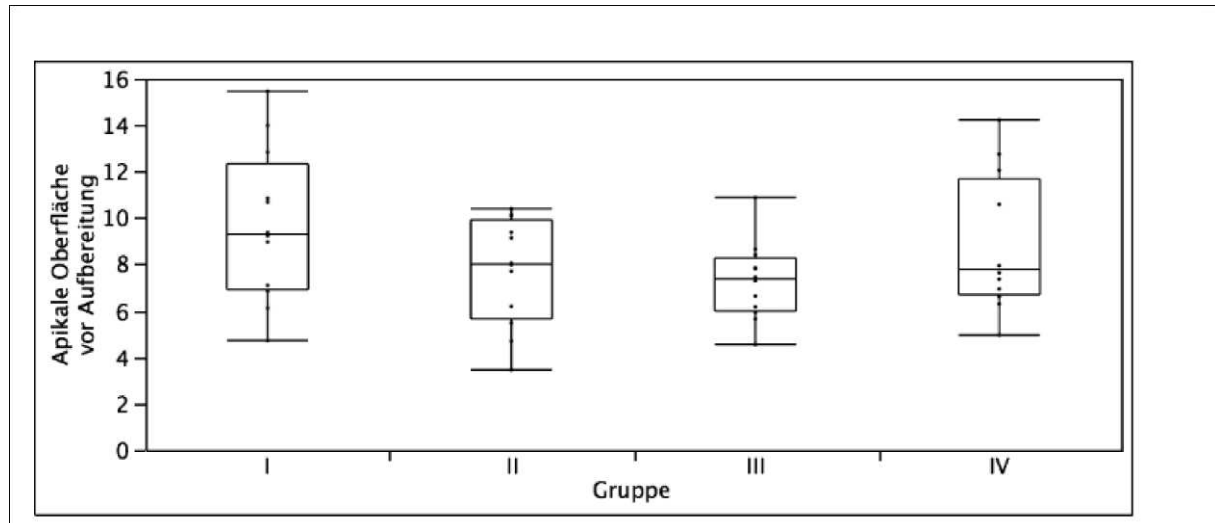


Abb. 6.4: Box-plot-Darstellung der apikalen Oberflächen der Wurzelkanäle vor Aufbereitung [mm²]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an.

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

Oberfläche der Wurzelkanäle	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV
Vor Aufbereitung	9.68 ± 3.26	7.72 ± 2.31	7.27 ± 1.66	8.77 ± 2.91

Tab. 6.4: Apikale Oberflächen der Wurzelkanäle vor Aufbereitung (Mittelwert \pm Standardabweichung [mm²]).

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

6.2 Vergleich der Daten nach Aufbereitung der Wurzelkanäle

6.2.1 Vergleich des Dentinabtrags

Der Abtrag von Dentin nach Aufbereitung der Wurzelkanäle mit den verschiedenen Methoden ist in Abbildung 6.5 und Tabelle 6.5 dargestellt. Die Varianzanalyse zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen (ANOVA $p < 0.05$). Die Mittelwerte lagen zwischen $1.26 \pm 0.54 \text{ mm}^3$ in Gruppe II und $2.50 \pm 1.37 \text{ mm}^3$ in Gruppe IV (Tab. 6.5, Abb. 6.5). Mit dem anschließenden Tukey-Kramer-HSD-Test konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen II und IV festgestellt werden ($p < 0.05$, Tab. 6.6).

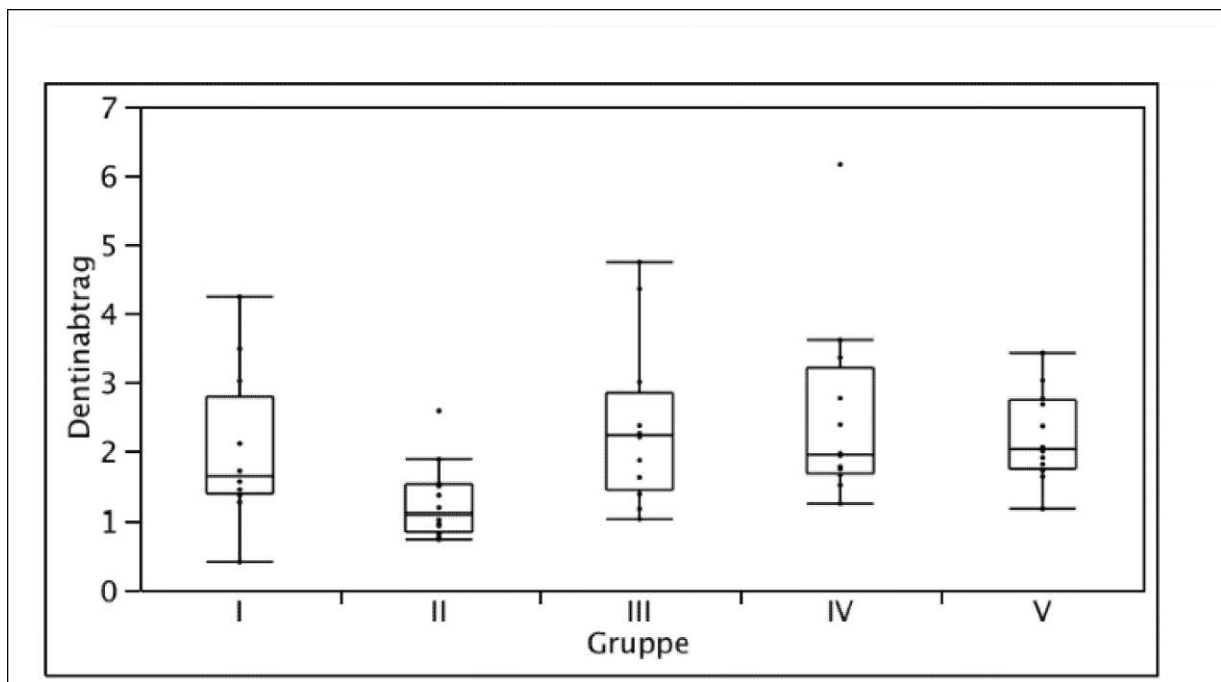


Abb. 6.5: Box-plot-Darstellung des Dentinabtrags nach Aufbereitung [mm³]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an. Datenpunkt außerhalb dieser Perzentile sind Ausreißer.
Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen
Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper
Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen
Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten
Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe 2 durch zirkumferentes Feilen

Dentinabtrag	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V
Nach Aufbereitung	2.01 ± 1.07	1.26 ± 0.54	2.35 ± 1.17	2.50 ± 1.37	2.20 ± 0.65

Tab. 6.5: Dentinabtrag nach Aufbereitung der Wurzelkanäle mit den verschiedenen Methoden (Mittelwert ± Standardabweichung [mm³]).

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen
Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper
Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen
Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten
Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe 2 durch zirkumferentes Feilen

Test Gruppe vs. Gruppe	Tukey-Kramer-HSD-Test
Gruppe I vs. Gruppe II	p = 0.3775
Gruppe I vs. Gruppe III	p = 0.9272
Gruppe I vs. Gruppe IV	p = 0.7615
Gruppe I vs. Gruppe V	p = 0.9903
Gruppe II vs. Gruppe III	p = 0.0807
Gruppe II vs. Gruppe IV	p = 0.0323 [†]
Gruppe II vs. Gruppe V	p = 0.1687
Gruppe III vs. Gruppe IV	p = 0.9957
Gruppe III vs. Gruppe V	p = 0.9969
Gruppe IV vs. Gruppe V	p = 0.9513

Tab. 6.6: Dentinabtrag nach Aufbereitung. Darstellung der p-Werte und Signifikanzen des Tukey-Kramer-HSD-Tests.
[†] = signifikant

6.2.2 Unbearbeitete Wurzelkanalwände

Der Anteil der unbearbeiteten Oberflächen an den Wurzelkanalwänden der gesamten Wurzelkanalwand nach Aufbereitung mit den verschiedenen Methoden ist in Abbildung 6.5 und Tabelle 6.5 dargestellt. Die Varianzanalyse zeigte einen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen (ANOVA $p < 0.01$). Die Mittelwerte lagen zwischen $59.6 \pm 14.9\%$ in Gruppe III und $80.0 \pm 10.3\%$ in Gruppe II (Tab. 6.7, Abb. 6.6). Mit dem anschließenden Tukey-Kramer-HSD-Test konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen II und III festgestellt werden ($p < 0.01$, Tab. 6.8).

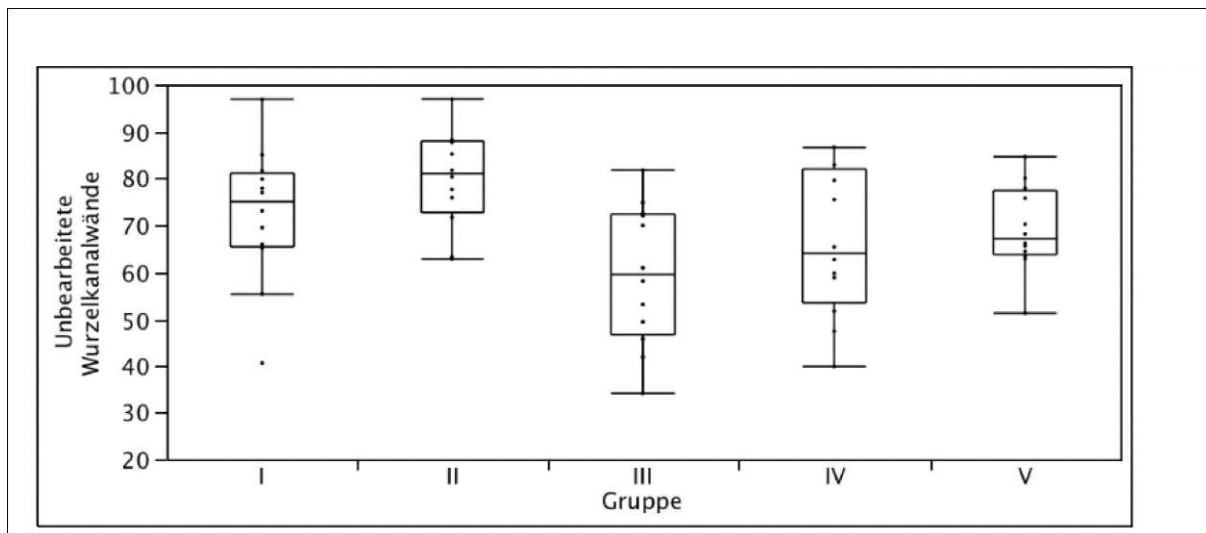


Abb. 6.6: Box-plot-Darstellung der unbearbeiteten Wurzelkanaloberflächen nach Aufbereitung im Verhältnis zum unbearbeiteten Kanal [%]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an. Datenpunkt außerhalb dieser Perzentile sind Ausreißer.

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe 2 durch zirkumferentes Feilen

Dentinabtrag	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V
Nach Aufbereitung	72.4 ± 14.6	80.0 ± 10.3	59.6 ± 14.9	66.2 ± 15.3	69.3 ± 9.1

Tab. 6.7: Unbearbeitete Wurzelkanaloberflächen nach Aufbereitung im Verhältnis zum unbearbeiteten Kanal (Mittelwert \pm Standardabweichung [%]).

Test Gruppe vs. Gruppe	Tukey-Kramer-HSD-Test
Gruppe I vs. Gruppe II	p = 0.6160
Gruppe I vs. Gruppe III	p = 0.1356
Gruppe I vs. Gruppe IV	p = 0.7722
Gruppe I vs. Gruppe V	p = 0.9776
Gruppe II vs. Gruppe III	p = 0.0032 [†]
Gruppe II vs. Gruppe IV	p = 0.0872
Gruppe II vs. Gruppe V	p = 0.2787
Gruppe III vs. Gruppe IV	p = 0.7401
Gruppe III vs. Gruppe V	p = 0.3824
Gruppe IV vs. Gruppe V	p = 0.9770

Tab. 6.8: Unbearbeitete Wurzelkanaloberflächen nach Aufbereitung.
Darstellung der p-Werte und Signifikanzen des
Tukey-Kramer-HSD-Tests.
[†] = signifikant

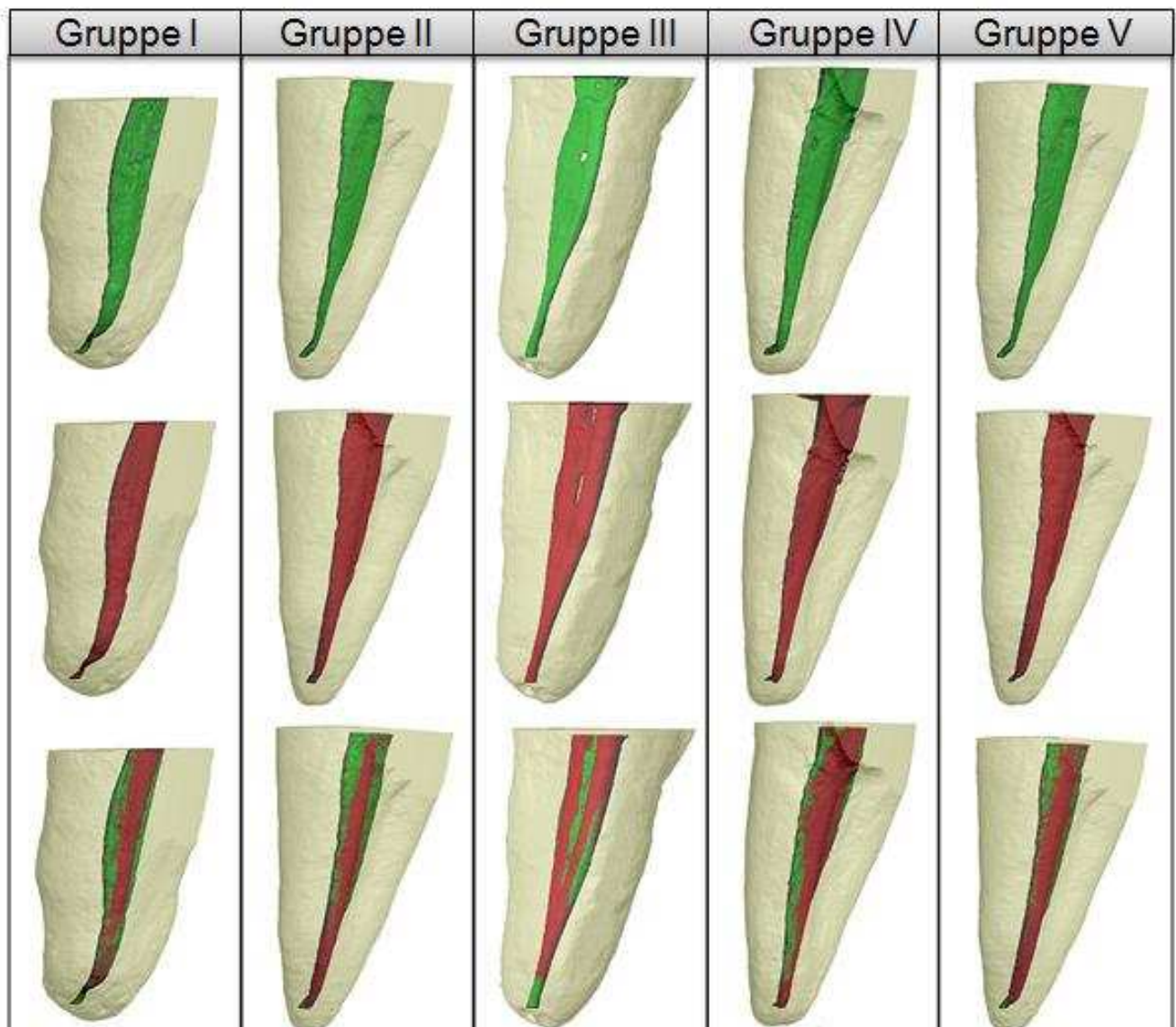


Abb. 6.9: Darstellung rekonstruierter Modelle der distalen Wurzeln von unteren Molaren; repräsentativ für die Gruppen I bis V. Die grüne Farbe zeigt die präoperativen Oberflächen (obere Reihe), die rote Farbe zeigt die postoperativen Oberflächen (mittlere Reihe). Die Überlagerung (untere Reihe) zeigt Größe und Lokalisierung der unbearbeiteten Bereiche. Die Wurzeln sind von approximal her dargestellt. Beachtlich ist, dass alle Techniken große Anteile der Wurzelkanaloberfläche unbearbeitet hinterließen.

Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen

Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper

Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen

Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten

Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe 2 durch zirkumferentes Feilen

6.2.3 Unbearbeitete apikale Wurzelkanalwände

Die Varianzanalyse der unbearbeiteten apikalen Oberflächen zeigte keine Unterschiede (ANOVA $p = 0.08$). Die Mittelwerte lagen zwischen $52.7 \pm 20.3\%$ in Gruppe V und $76.1 \pm 17.0\%$ in Gruppe I (Tab. 6.9, Abb. 6.7).

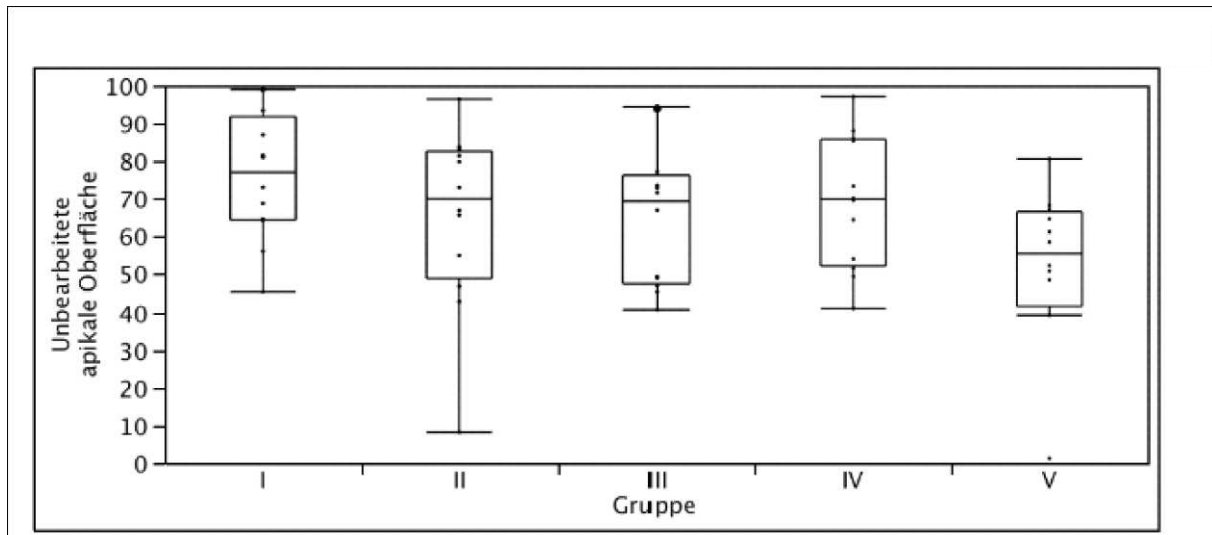


Abb. 6.7: Box-plot-Darstellung der unbearbeiteten apikalen Wurzelkanaloberflächen nach Aufbereitung im Verhältnis zum unbearbeiteten apikalen Kanal [%]. Die „Box“ gibt den Bereich vom 25. zum 75. Perzentil an, der horizontale Strich in der Box entspricht dem Median. Die unteren und oberen Querlinien geben die 10% und 90% Perzentile an. Datenpunkt außerhalb dieser Perzentile sind Ausreißer.
 Gruppe I: Zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen
 Gruppe II: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper
 Gruppe III: Maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von 2 Kanälen
 Gruppe IV: Zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper Instrumenten
 Gruppe V: Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe 2 durch zirkumferentes Feilen

Dentinabtrag	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V
Nach Aufbereitung	76.1 ± 17.0	65.3 ± 24.1	65.2 ± 18.7	69.2 ± 17.7	52.7 ± 20.3

Tab. 6.9: Unbearbeitete apikale Wurzelkanaloberflächen nach Aufbereitung im Verhältnis zum unbearbeiteten apikalen Kanal (Mittelwert \pm Standardabweichung [%]).

7 Diskussion

7.1 Diskussion der Methode

7.1.1 Mikro-Computertomographie

Um die Effekte einer Wurzelkanalaufbereitung auf die Kanalmorphologie zu evaluieren, wird jeweils die präoperative und postoperative Wurzelkanalanatomie miteinander verglichen. In der Vergangenheit war dies aber technisch nicht realisierbar. Man konnte die Anatomie von extrahierten Zähnen beispielsweise in Form von Schliffpräparaten darstellen. Jedoch konnte man den Zahn danach nicht mehr präparieren. Umgekehrt konnte man den Zahn nach einer Präparation zersägen und evaluieren, aber nicht mit der präoperativen Anatomie vergleichen.

Bramante et al. (1987) entwickelten ein Muffelsystem, das erstmals die Analyse von Wurzelkanalquerschnittsflächen vor und nach der Aufbereitung ermöglichte. Die Versuchszähne wurden in Kunststoff fixiert und anschliessend in Gips eingebettet. Dadurch wurde es möglich, den Versuchszahn zu sägen und die Querschnitte wieder in die Gipsform zu reponieren, um dann die Wurzelkanäle zu präparieren. Durch die Anfertigung von prä- und postoperativen Fotos, Pauszeichnungen oder standardisierten Röntgenbilder lassen sich quantitative Aussagen über den Dentinabtrag (Imura et al. 2001, Glossen et al. 1995), den Kanaldurchmesser und Querschnittsflächen oder die Kanalbegradigung treffen (Grande et al. 2007, Hülsmann et al. 1999).

Durch die Verwendung dieses modifizierten Muffelsystems wurde eine standardisierte und reproduzierbare Versuchsdurchführung und -auswertung ermöglicht und erlaubte vergleichbare Studien an extrahierten Zähnen durchzuführen. Später wurde die Idee des Muffelsystems von verschiedenen Autoren aufgegriffen und weiterentwickelt (Hülsmann et al. 1999, Campos und del Rio 1990, Calhoun und Montgomery 1988). Der Nachteil dieser Methode war, dass eine Aufbereitung am intakten Zahn nicht exakt simuliert werden konnte, da an den Schnittstellen durch die Dicke und die Schwingung des Sägeblattes ein unvermeidbarer Verlust in der Länge der Wurzel resultierte (Portenier et al. 1998). Außerdem war mit dieser Technik eine weiterführende, dreidimensionale Analyse

nicht möglich, da nur die Ebenen der Sägeschnitte Schlüsse über die Veränderung der Kanalgeometrie zuließen.

Weil auch die nicht-destruktive Methode der klinischen Radiographie nur zweidimensionale Schlüsse erlaubte, wurde eine röntgenologische Technik gesucht, die fähig ist, das Wurzelkanalsystem dreidimensional darzustellen. Der Einsatz von tomographischen Scannern für die experimentelle Zahnmedizin wurde vorgeschlagen (Tachibana und Matsumoto 1990). Obwohl die Tomographie derzeit für die Kieferchirurgie verwendet wurde (Youssefzadeh et al. 1999) blieb sie für die Endodontologie bedeutungslos. Die niedrige Auflösung der konventionellen Computertomographen erlaubte keine genauen Analysen des Wurzelkanalssystems. Signifikante Verbesserungen sowohl in der Software als auch in der Hardware konnten die Schichtdicke von konventionellen Computertomographen (ca. 1.5 mm) (Gambill et al. 1996) zu denen von sogenannten Mikro-Computertomographen reduzieren (81 µm) (Rhodes et al. 1999) und machten diese Technologie für die Endodontologie wieder interessant.

Der in der vorliegenden Studie verwendete Mikro-Computertomograph scannte mit einer isotropen Auflösung von 34 µm. Diese Methodik wurde bereits ausgiebig in Studien zur genauen Analyse der endodontischen Präparationsergebnisse mit verschiedenen Instrumenten in extrahierten Zähnen genutzt (Paqué et al. 2009, Peters et al. 2001a, Peters et al. 2001b). Sie liefert sehr detaillierte Bilder der feinen dreidimensionalen Struktur der Wurzelkanalanatomie und ermöglicht einen Vergleich zwischen der prä- und postoperativen Anatomie, ohne dass die Zähne dazu zerstört werden müssen.

Allerdings beschreibt die Methodik der vorliegenden Studie die dreidimensionale Entfernung von Material durch eine Änderung der Voxel ($34 \times 34 \times 34 \text{ µm} = 1 \text{ Voxel}$) an der Oberfläche. Dies erfordert eine Präparation des Dentins von mindestens 34 µm um überhaupt als "bearbeitete Oberfläche" registriert zu werden. Wird also bei der Präparation weniger als 34 µm Dentin entfernt, wird ein Voxel nur angeschnitten und nicht vollständig entfernt. Es resultiert somit keine Änderung der Voxel-Anzahl und die Entfernung des Materials bleibt unerkant. Oberflächen, die nur wenig bearbeitet werden, werden so als "unbearbeitete Oberflächen" registriert. Technisch gesehen reicht die derzeit höchste erreichbare Mikro-Computertomographen-Auflösung in vitro zwar von 5 bis < 1 µm (Engelke et al. 1999). Allerdings ergibt die Schichtdicke von 34 µm eine genügend akzeptable Bildqualität, weil sich die Wurzelkanalanatomie

nur allmählich in der Längsachse ändert. Nur Seitenkanäle, die sich genau in einer Schicht befinden, können unter Umständen nicht wahrgenommen werden, wenn deren Durchmesser kleiner als die Schichtdicke ist (Peters et al. 2000).

Die vorliegende Studie ist die erste Studie, die mit einer nicht-destruktiven dreidimensionalen Methode die Fähigkeit rotierender Instrumente zur Aufbereitung von Wurzelkanälen mit einem länglich ovalen Querschnitt zu quantifizieren vermag. Diese Tatsache allein erschwert den direkten Vergleich zur früheren Studien (Elayouti et al. 2008, Weiger et al. 2002, Wu und Wesselink 2001). Insgesamt stellt die dargelegte Methodik jedoch eine interessante und wertvolle Methode für die experimentelle Endodontie dar (Rhodes et al. 1999). Für den klinischen Gebrauch ist eine Anwendung des Mikro-Computertomographen in absehbarer Zeit noch nicht zu erwarten, insbesondere da das Verfahren sehr zeitaufwendig ist. Das Einscannen eines einzelnen Zahns dauert mit den modernsten Mikro-Computertomographen ca. 1 bis 2 Stunden. Dennoch können die Erkenntnisse, die an den Mikro-Computertomographen-basierenden Modellen gewonnen werden, helfen, die endodontische Therapie am Patienten zu optimieren.

7.1.2 Auswahl der Präparate

Bei der Wahl der Präparate in wissenschaftlichen Studien sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Einerseits ist es wünschenswert, möglichst standardisierte Bedingungen zu schaffen, um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten. Andererseits sollen bei Laborversuchen die Testumstände möglichst nahe an der klinischen Realität liegen. Eine Möglichkeit, die Wurzelkanalaufbereitung zu untersuchen ist die Verwendung von konfektionierten Kunststoffblöcken mit simulierten Wurzelkanälen (Szep et al. 2001, Thompson und Dummer 1997a, Thompson und Dummer 1997b). Dabei liegen immer die gleiche Härte des Materials und die gleiche Form und Krümmung der Wurzelkanäle vor. Diese normierten Bedingungen lassen einen exakten Vergleich von verschiedenen Aufbereitungsmethoden und Instrumenten zu. Allerdings unterscheiden sich die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Kunststoffmaterialien von denen des pulpanahen, menschlichen Dentins. Die Mikrohärtigkeit von Dentin beträgt pulpanah 35-

40 kg/mm², die von Kunststoffmaterialien jedoch nur 20-22 kg/mm² (Miserendino et al. 1988, Weine et al. 1975). Folglich wird für die Bearbeitung des natürlichen Kanalwanddentins doppelt so viel Kraft benötigt wie für den Abtrag an Kunststoffmodellen (Lim und Webber 1985). Ausserdem können Kunststoffmodelle die natürliche Komplexität des Wurzelkanallumens nicht ausreichend simulieren (Hülsmann 2000).

Um einen möglichst praxisnahen Vergleich der üblicherweise empfohlenen Methoden zur Aufbereitung von Wurzelkanälen mit länglich ovalem Querschnitt zu erzielen, wurden in dieser Studie nur frisch extrahierte, menschliche Unterkiefer-Molaren verwendet. Die distalen Wurzelkanäle der Unterkiefermolaren in diesem Experiment wiesen in einer Entfernung von 6 mm zum Apex ein mittleres Durchmesser-Verhältnis von 1:3.9 auf. Wu et al. (2000a) konnten zeigen, dass in 30 % aller Unterkiefermolaren in dieser Entfernung vom Apex ovale Kanäle zu finden sind. Mit einem mittleren Durchmesser-Verhältnis von 1:3.9 werden die untersuchten Wurzelkanäle nach Jou et al. (2004) nicht mehr als oval, sondern als länglich oval bezeichnet.

7.2 Diskussion der Ergebnisse vor der Aufbereitung der Wurzelkanäle

Die Mittelwerte der Gesamtvolumina der distalen Wurzelkanäle von Unterkiefer-Molaren in dieser Studie lagen vor der Aufbereitung zwischen $6.39 \pm 1.66 \text{ mm}^3$ und $7.60 \pm 2.53 \text{ mm}^3$. Für die Volumina mesialer Kanäle von Unterkiefer-Molaren ermittelten Gekelmann et al. (2009) in ihrer Studie Mittelwerte zwischen $1.40 \pm 0.84 \text{ mm}^3$ und $1.53 \pm 0.89 \text{ mm}^3$. Verglichen mit den Wurzelkanalvolumina von mesialen Wurzelkanälen sind ovale distale Wurzelkanäle von Unterkiefer-Molaren deutlich voluminöser.

Auch die gesamte Wurzelkanaloberfläche mit Mittelwerten zwischen $37.52 \pm 8.32 \text{ mm}^2$ und $42.78 \pm 12.61 \text{ mm}^2$ war im Vergleich zu den Zähnen aus der Studie von Gekelmann et. al deutlich größer (Mittelwerte von $12.94 \pm 5.51 \text{ mm}^2$ bis $12.38 \pm 4.46 \text{ mm}^2$).

Paqué und Peters (2011) untersuchten vor kurzem ebenfalls ovale distale Wurzelkanäle in Unterkiefer-Molaren und ermittelten sehr ähnliche Werte für das Kanalvolumen ($7.73 \pm 2.13 \text{ mm}^3$) und die Kanaloberfläche ($42.83 \pm 8.14 \text{ mm}^2$).

Die Mittelwerte der Volumina aller Gruppen liegen sehr nahe beieinander. Dies gilt sowohl im gesamten Wurzelkanal, als auch im apikalen Bereich. Es konnte kein statistischer Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden.

Auch die Mittelwerte der Wurzelkanaloberflächen liegen sehr nahe beieinander und es gibt keinen statistischen Unterschied zwischen den Wurzelkanaloberflächen im gesamten und im apikalen Bereich des Kanals. Dies zeigt, dass die Zähne gleichmäßig auf die Gruppen verteilt waren.

7.3 Diskussion der Ergebnisse nach der Aufbereitung der Wurzelkanäle

7.3.1 Vergleich des Dentinabtrags

Die Volumina der Wurzelkanäle aller Gruppen haben durch die Präparation zugenommen. Das mittlere Volumen des Dentinabtrags bei der Aufbereitung belief sich in Gruppe I (zirkumferentes Feilen mit Hedstroem-Feilen) auf $2.01 \pm 1.07 \text{ mm}^3$, in Gruppe II (maschinelle Aufbereitung mit ProTaper) auf $1.26 \pm 0.54 \text{ mm}^3$ in Gruppe III (maschinelle Aufbereitung mit ProTaper unter Simulation von zwei Kanälen) $2.35 \pm 1.17 \text{ mm}^3$, in Gruppe IV (zirkumferentes Feilen mit maschinell rotierenden ProTaper-Instrumenten) $2.50 \pm 1.37 \text{ mm}^3$ und in Gruppe V (Nachbearbeitung der Zähne aus Gruppe II durch zirkumferentes Feilen) $2.20 \pm 0.65 \text{ mm}^3$. Hierbei fällt auf, dass in der Gruppe II am wenigsten Dentin abgetragen wurde, während im Vergleich hierzu bei allen anderen Gruppen beinahe das doppelte Volumen abgetragen wurde.

Ein signifikanter Unterschied im Dentinabtrag konnte nur zwischen der Gruppe II und der Gruppe IV festgestellt werden. Die Unterschiede zwischen den anderen Gruppen waren nicht signifikant. Auffällig ist, dass der Vergleich der einzelnen Gruppen mit der Gruppe II die größten Unterschiede aufweist, auch wenn diese Unterschiede nicht signifikant sind. Der geringere Dentinabtrag der Gruppe II kann damit erklärt werden, dass auf die Instrumente bei der maschinellen Aufbereitung mit ProTaper im Gegensatz zu allen anderen Gruppen während der Präparation kein lateraler Druck ausgeübt wurde. Das Instrument wurde nur am Ort des geringsten Widerstandes in den Kanal eingeführt. In der Gruppe IV hingegen wurden die

ProTaper-Feilen dreimal mit lateralem Druck in alle Richtungen zirkumferent im Kanal angewendet. Durch die längere Verweildauer der aggressiv schneidenden und stark konischen ProTaper-Feilen und durch den auf sie angewendeten lateralen Druck kam es vermutlich zu einem erhöhten Dentinabtrag vor allem im koronalen Drittel der Wurzel.

Ein erhöhter Dentinabtrag liefert allerdings keine direkten Aussagen über einen gleichmäßig verteilten Abtrag der inneren Dentinschicht. Der Dentinabtrag könnte nur in einem bestimmten Bereich der Wurzel erfolgt sein, während andere Bereiche unbearbeitet blieben. Ein Nachteil des erhöhten Dentinabtrags kann die Schwächung der Wurzel sein, insbesondere wenn der Abtrag nur an bestimmten Stellen der Wurzel erfolgte. Sornkul und Stannard (1992) zeigten, dass Zähne durch die Aufbereitung der Wurzelkanäle signifikant geschwächt werden und die Menge an entferntem Dentin mit der erhöhten Frakturgefahr des betroffenen Zahns korrelierte.

Ein Vorteil durch die stärkere Erweiterung der Wurzelkanäle ist die vereinfachte Applikation von Spüllösungen in tiefere Regionen des Wurzelkanals. Spüllösungen stellen eine unterstützende chemische Bearbeitung der Wurzelkanäle dar. Sie unterstützen die Desinfektion des Kanals und entfernen, was die mechanische Bearbeitung im Wurzelkanal nicht zu entfernen vermag. Die Desinfektion des Wurzelkanals scheint für das endodontische Ergebnis sehr entscheidend zu sein (Haapasalo et al. 2005). Die Entfernung von Mikroorganismen geschieht durch eine Kombination der mechanischen Aufbereitung und der Spülung (Estrela et al. 2009, Byström und Sundqvist 1981).

Die Anzahl der untersuchten Kanäle pro Gruppe ($n = 12$) ist vergleichsweise gering. Unbeantwortet bleibt somit die Frage, ob bei einer größeren Versuchsgruppe ($n \geq 12$) ein signifikanter Unterschied zwischen anderen Gruppen aufgezeigt werden könnte.

7.3.2 Vergleich der unbearbeiteten Wurzelkanalwände

Eine genaue Überlagerung der detaillierten prä- und postoperativen Wurzelkanalmodelle ermöglichte die Ermittlung des Anteils der unbearbeiteten Wurzelkanaloberfläche.

Keine der untersuchten Methoden zur Aufbereitung von Wurzelkanälen mit ovalem Querschnitt konnte den Kanal vollständig aufbereiten. Bei allen Gruppen blieb ein wesentlicher Anteil der Wurzelkanaloberfläche unbearbeitet. Der Anteil der unbearbeiteten Oberflächen an der gesamten Wurzelkanalwand nach Aufbereitung betrug in Gruppe I $72.4 \pm 14.6\%$, in Gruppe II $80.0 \pm 10.3\%$, in Gruppe III $59.6 \pm 14.9\%$, in Gruppe IV $66.2 \pm 15.3\%$ und in Gruppe V $69.3 \pm 9.1\%$. Die Zähne der Versuchsgruppe II schneiden wie beim Dentinabtrag am schlechtesten ab. Ein signifikanter Unterschied konnte nur zwischen den Gruppen II und III festgestellt werden ($p < 0.01$). Dieser hochsignifikante Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass bei der Gruppe II nicht versucht wurde, die lateralen Recessus aufzubereiten. Es entstand eine zirkuläre Ausbuchtung, während der bukkale und linguale Recessus unbearbeitet und wahrscheinlich mit Debris und Smear layer gefüllt blieben. In Gruppe III wurde hingegen versucht, die oralen und vestibulären Recessus mit gezieltem Druck unter Simulation von zwei Kanälen aufzubereiten. Die schwierig zu erreichenden, schmalen, lateralen Recessus wurden so besser erweitert und blieben nicht vollständig unbearbeitet.

Interessant ist auch der Vergleich zwischen der Aufbereitung unter Simulation von zwei Kanälen (Gruppe III) und den Aufbereitungsmethoden durch zirkumferentes Feilen (Gruppen I, IV, V). Eine zirkumferente Anwendung der Instrumente im Kanal scheint der gezielten Präparation der lateralen Recessus unter Simulation von zwei Kanälen unterlegen zu sein. Die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Eine zirkumferente Präparation mit maschinell rotierenden ProTaper-Instrumenten trägt über den gesamten Kanal zwar am meisten Dentin ab, führt aber nicht zu einem größeren Anteil von bearbeiteter Wurzelkanaloberfläche. Die koronal breiten ProTaper-Instrumente können vermutlich die lateralen Recessus weniger gut erreichen, wenn sie nicht mit gezieltem Druck in die lateralen Recessus dirigiert werden. In Gruppe IV wurde durch die aktive Schneideleistung der ProTaper-Instrumente und durch die zirkumferente Anwendung der Instrumente im Kanal vermehrt Dentin abgetragen. Dies führte zu einer Schwächung der Wurzel, nicht aber

zu einem größeren Anteil von bearbeiteter Wurzelkanaloberfläche.

Das zusätzliche, zirkumferente Feilen mit Hedstroem-Feilen in der Gruppe V konnte den Anteil der unbearbeiteten Fläche auf $69.3 \pm 9.1\%$ verringern, hinterließ aber immer noch einen größeren Anteil an unbearbeiteter Oberfläche als die Aufbereitung unter Simulation von zwei Kanälen (Gruppe III).

Bei der separaten Analyse der unbearbeiteten apikalen Oberflächen konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen festgestellt werden. Die Mittelwerte lagen zwischen $52.7 \pm 20.3\%$ in Gruppe V und $76.1 \pm 17.0\%$ in Gruppe I. Die Präparation des apikalen Bereichs ovaler Kanäle kann als nicht zufriedenstellend betrachtet werden. Die Instrumente sind zu flexibel und können dem vom Zahnarzt ausgeübten Druck auf das Winkelstück/Instrument an der Instrumentenspitze nicht folgen. Besonders die Superelastizität der NiTi-Instrumente erlaubt keine kontrollierte Präparation der bukkalen und lingualen Extensionen der ovalen Kanäle (Barbizam et al. 2002, Rödiger et al. 2002, Wu et al. 2000a). Offenbar spielt es für die apikalen vier Millimeter keine Rolle, welche der untersuchten Aufbereitungsmethoden angewendet wurde.

Die Anzahl der untersuchten Kanäle pro Gruppe ($n = 12$) ist vergleichsweise gering und demzufolge ist die Standardabweichung des Parameters "unbehandelte Oberfläche im Kanal" relativ hoch. Andererseits wurden sehr strenge Einschlusskriterien angewendet und die Studie wurde zudem sehr sorgfältig durchgeführt. Deshalb können die nachgewiesenen Effekte auf die Gestaltung des Wurzelkanals durch die verschiedenen Kanalaufbereitungsstrategien geltend gemacht werden.

Verglichen mit anderen Studien, welche in Oberkiefermolaren durchgeführt und mit Hilfe der Mikro-Computertomographie analysiert wurden (Paqué et al. 2009, Peters et al. 2001b), ist der Anteil der unbearbeiteten Fläche in den Wurzelkanälen unterer Molaren der vorliegenden Studie höher. Dies ist auf die besondere Schwierigkeit bei der Gestaltung länglich ovaler Kanäle zurückzuführen.

Die Methodik der vorliegenden Studie beschreibt die dreidimensionale Entfernung von Material durch eine Änderung der Voxel an der Oberfläche. Dies erfordert im Durchschnitt eine Präparation des Dentins von mindestens $34 \mu\text{m}$ um überhaupt als "bearbeitete Oberfläche" registrieren zu werden (siehe Kapitel 7.1.1). Wird bei der Präparation weniger als $34 \mu\text{m}$ Dentin entfernt, wird ein Voxel nur angeschnitten und

nicht vollständig entfernt. Es resultiert somit keine Änderung der Voxel-Anzahl und die Entfernung des Materials bleibt unerkannt. Eine Analyse der bearbeiteten Wurzeloberfläche durch modernere Mikro-Computertomographen mit besserer Auflösung hätte auch Präparationen von weniger als 34 µm erkannt und der Anteil der unbearbeiteten Oberfläche wäre vermutlich nicht so hoch gewesen.

Weiger et al. (2002) zeigten, dass selbst wenn jede kleinste Veränderung der Kanalwand durch eine Wurzelkanalaufbereitung angerechnet wurde, zwischen 44% und 68% der Oberfläche in länglich ovalen Kanälen unbearbeitet blieben. In einer neueren Studie wies die gleiche Gruppe um Weiger lediglich 25% bis 35% unbearbeitete Kanaloberflächen nach, sofern der Wurzelkanal mit rotierenden Instrumenten aufbereitet wurde. Wenn allerdings die Oberfläche erst nach einem Materialabtrag von mindestens 200 µm als bearbeitet galt, wurden 80% oder mehr der Kanaloberfläche nicht als präpariert gezählt (Elayouti et al. 2008). Besonders galt dies für die apikalen Kanalabschnitte, in denen bis zu drei Viertel der Kanaloberfläche in der vorliegenden Studie unbearbeitet blieben.

Die Desinfektion des Wurzelkanals scheint für das endodontische Ergebnis sehr entscheidend zu sein (Haapasalo et al. 2005). Die Entfernung von Mikroorganismen geschieht durch eine Kombination der mechanischen Aufbereitung und der Spülung (Estrela et al. 2009, Byström und Sundqvist 1981). Eine Spülung allein reicht für ein genügendes Resultat nicht aus, was eine zusätzliche mechanische Bearbeitung der Kanalwände durch Präparationsinstrumente, einschließlich der Entfernung des infizierten Dentins und die Platzierung von desinfizierenden Medikamenten wie Kalziumhydroxid wünschenswert macht (Nair et al. 2005). Sowohl der Effekt der mechanischen Aufbereitung als auch die Wirksamkeit der Spülung ist abhängig von einer adäquaten Kanalerweiterung.

Die Wirksamkeit der mechanischen Desinfektion hängt von der Entfernung der inneren Schicht des infizierten Dentins oder zumindest des unvollständig mineralisierten Prädentins ab (Siqueira et al. 1997). Es hat sich jedoch gezeigt, dass Bakterien bis in eine Tiefe von 200 µm und mehr in die Dentintubuli eindringen können (Love und Jenkinson 2002). Die vorliegende Studie zeigt jedoch, dass in länglich ovalen Wurzelkanälen bei mehr als 50% der Kanaloberfläche weniger als eine 34 µm breite Dentinschicht entfernt werden konnte.

Die antibakterielle Wirksamkeit wurde in der vorliegenden Studie nicht ermittelt. Die mechanische Aufbereitung vermag dagegen bakterielle Biofilme stärker zu

beeinflussen als frei lebende Mikroorganismen in ihren planktonischen Zustand (Burleson et al. 2007). Es scheint deshalb wünschenswert, auch die Menge des entfernten Biofilms mit einem Mikro-Computertomographen zu quantifizieren. Mit weiteren Verbesserungen der Hard- und Software könnten solche Analysen in naher Zukunft möglich sein.

Die Aufbereitung von ovalen Wurzelkanälen in Unterkiefermolaren hinterlässt einen hohen Prozentsatz der Kanaloberfläche unbearbeitet - unabhängig von der verwendeten Instrumentierungstechnik. Werden jedoch länglich ovale Kanäle unter Simulation je eines separaten bukkalen und lingualen Kanals aufbereitet, scheint dies von Vorteil zu sein.

Unabhängig von den verwendeten Techniken kann man in der vorliegenden Studie eine begrenzte Möglichkeit der mechanischen Aufbereitung in den apikalen vier Millimeter feststellen, was die Notwendigkeit für zusätzliche Maßnahmen bei der chemischen Desinfektion zeigt.

Die Präparation von Unterkiefer-Molaren mit länglich ovalen Querschnitten stellt eine außerordentliche Herausforderung dar.

8 Literaturverzeichnis

- Ahlquist M, Henningsson O, Hultenby K, Ohlin J: The effectiveness of manual and rotary techniques in the cleaning of root canals: a scanning electron microscopy study. *Int Endod J* 34: 533-537 (2001)
- Ahmad M, Roy R, Kamarudin A: Observations of acoustic streaming fields around an oscillating ultrasonic file. *Endod Dent Traumatol* 8: 189-194 (1992)
- Ahmad M, Pitt Ford TR, Crum LA, Walton A: Ultrasonic debridement of root canals: acoustic cavitation and its relevance. *Int Endod J* 42: 391-398 (1988)
- Ahmad M, Pitt Ford TR, Crum LA: Ultrasonic debridement of root canals: acoustic streaming and its possible role. *J Endod* 13: 490-499 (1987)
- Armitage G, Ryder M, Wilcox S: Cemental changes in teeth with heavily infected root canals. *J Endod* 9: 127-130 (1983)
- Aydin C, Tunca Y, Senses Z, Baysallar M, Kayaoglu G, Ørstavik D: Bacterial reduction by extensive versus conservative root canal instrumentation in vitro. *Acta Odontol Scand* 65: 167-170 (2007)
- Barbizam J, Fariniuk L, Marchesan M, Pecora J, Sousa-Neto M: Effectiveness of manual and rotary instrumentation techniques for cleaning flattened root canals. *J Endod* 28: 365-366 (2002)
- Bergmans L, Van Cleynenbreugel J, Beullens M, Wevers M, Van Meerbeek B, Lambrechts P: Progressive versus constant tapered shaft design using NiTi rotary instruments. *Int Endod J* 36: 288-295 (2003)
- Berutti E, Negro A, Lendini M, Pasqualini D: Influence of manual preflaring and torque on the failure rate of ProTaper rotary instruments. *J Endod* 30: 228-230 (2004)
- Berutti E, Chiandussi G, Gaviglio I, Ibba A: Comparative analysis of torsional and bending stresses in two mathematical models of nickel-titanium rotary instruments: ProTaper versus ProFile. *J Endod* 29: 15-19 (2003)
- Bramante C, Berbert A, Borges RP: A methodology for evaluation of root canal instrumentation. *J Endod* 13: 243-245 (1987)
- Burleson A, Nusstein J, Reader A, Beck M: The in vivo evaluation of hand/rotary/ultrasound instrumentation in necrotic, human mandibular molars. *J Endod* 33: 782-787 (2007)

- Byström A, Sundqvist G: Bacteriologic evaluation of the efficacy of mechanical root canal instrumentation in endodontic therapy. *Scand J Dent Res* 89: 321-328 (1981)
- Calhoun G, Montgomery S: The effects of four instrumentation techniques on root canal shape. *J Endod* 14: 273-277 (1988)
- Campos JM, del Rio C: Comparison of mechanical and standard hand instrumentation techniques in curved root canals. *J Endod* 16: 230-234 (1990)
- Clauder T, Baumann MA: ProTaper NT system. *Dent Clin North* 48: 87-111 (2004)
- Cline HE, Lorensen WE, Ludke S, Crawford CR, Teeter BC: Two algorithms for the three-dimensional reconstruction of tomograms. *Med Phys* 15: 320-327 (1988)
- Cunningham C, Senia E: A three-dimensional study of canal curvatures in the mesial roots of mandibular molars. *J Endod* 18: 294-300 (1992)
- Dalton B, Orstavik D, Phillips C, Pettiette M, Trope M: Bacterial reduction with nickel-titanium rotary instrumentation. *J Endod* 24: 763-767 (1998)
- de Pablo OV, Estevez R, Péix Sánchez M, Heilborn C, Cohenca N: Root anatomy and canal configuration of the permanent mandibular first molar: a systematic review. *J Endod* 36: 1919-1931 (2010)
- Elayouti A, Chu A, Kimionis I, Klein C, Weiger R, Löst C: Efficacy of rotary instruments with greater taper in preparing oval root canals. *Int Endod J* 41: 1088-1092 (2008)
- Engelke K, Karolczak M, Lutz A, Seibert U, Schaller S, Kalender W: Micro-CT technology and application for assessing bone structure. *Radiologie* 39: 203-212 (1999)
- Esposito PT, Cunningham C: A comparison of canal preparation with nickel-titanium and stainless steel instruments. *J Endod* 21: 173-176 (1995)
- Estrela C, Blitzkow G, Figuereido J: Antibacterial efficacy of intracanal medicaments on bacterial biofilm: a critical review. *J Appl Oral Sci* 2009 17: 1-7 (2009)
- European society of endodontology: Quality guidelines for endodontic treatment: consensus report of the European Society of Endodontology. *Int Endod J* 39: 921-930 (2006)
- Evans G, Speight P, Gulabivala K: The influence of preparation technique and sodium hypochlorite on removal of pulp and predentine from root canals of posterior teeth. *Int Endod J* 34: 322-330 (2001)

- Gambill JM, Alder M, del Rio CE: Comparison of nickel-titanium and stainless steel hand-file instrumentation using computed tomography. J Endod 22: 369-375 (1996)
- Gani O, Visvisian C: Apical canal diameter in the first upper molar at various ages. J Endod 25: 689-689 (1999)
- Gekelman D, Ramamurthy R, Mirfarsi S, Paqué F, Peters OA: Rotary nickel-titanium GT and ProTaper files for root canal shaping by novice operators: a radiographic and micro-computed tomography evaluation. J Endod 35: 1584-1588 (2009)
- Glossen CR, Haller RH, Dove SB, del Rio CE: A comparison of root canal preparations using Ni-Ti hand, Ni-Ti engine-driven, and K-Flex endodontic instruments. J Endod 21: 146-151 (1995)
- Gluskin A, Brown D, Buchanan L: A reconstructed computerized tomographic comparison of Ni-Ti rotary GT files versus traditional instruments in canals shaped by novice operators. Int Endod J 34: 476-484 (2001)
- Grande NM, Plotino G, Butti A, Messina F, Pameijer CH, Somma F: Cross-sectional analysis of root canals prepared with NiTi rotary instruments and stainless steel reciprocating files. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 103: 120-126 (2007)
- Gutmann J, Witherspoon DE, Cohen S, Burns RC: Obturation of the cleaned and shaped root canal system. Pathways of the Pulp, 7th ed., St. Louis, USA: 258 - 361 (1998)
- Haapasalo M, Endal U, Zandi H: Eradication of endodontic infection by instrumentation and irrigation solutions. Endod Topics 10: 77 - 102 (2005)
- Haapasalo M, Orstavik D: In vitro infection and disinfection of dentinal tubules. J Dent Res 66: 1375-1379 (1987)
- Hess W: Formation of root canal in human teeth. In J Natl Dent Assoc 3: 704-734 (1921)
- Hülsmann M, Peters OA, Dummer PMH: Mechanical preparation of root canals; shaping goals, techniques and means. Endod Top 10: 30-76 (2005)
- Hülsmann M: Entwicklung einer Methodik zur standardisierten Überprüfung verschiedener Aufbereitungsparameter und vergleichende In-vitro-Untersuchung unterschiedlicher Systeme zur maschinellen Wurzelkanalaufbereitung. Quintessenz: (2000)

- Hülsmann M, Gambal A, Bahr R: An improved technique for the evaluation of root canal preparation. *J Endod* 25: 599-602 (1999)
- Hülsmann M, Rummelin C, Schäfers F: Root canal cleanliness after preparation with different endodontic handpieces and hand instruments: a comparative SEM investigation. *J Endod* 23: 301-306 (1997)
- Imura N, Kato AS, Novo NF, Hata G, Uemura M, Toda T: A comparison of mesial molar root canal preparations using two engine-driven instruments and the balanced-force technique. *J Endod* 27: 627-631 (2001)
- Jou Y, Karabucak B, Levin J, Liu D: Endodontic working width: current concepts and techniques. *Dent Clin North Am* 48: 323-335 (2004)
- Kerekes K, Tronstad L: Morphometric observations on root canals of human anterior teeth. *J Endod* 3: 24-29 (1977a)
- Kerekes K, Tronstad L: Morphometric observations on root canals of human premolars. *J Endod* 3: 74-79 (1977b)
- Kerekes K, Tronstad L: Morphometric observations on the root canals of human molars. *J Endod* 3: 114-118 (1977c)
- Lim KC, Webber J: The effect of root canal preparation on the shape of the curved root canal. *Int Endod J* 18: 233-239 (1985)
- Love R, Jenkinson H: Invasion of dentinal tubules by oral bacteria. *Crit Rev Oral Biol Med* 13: 171-183 (2002)
- Lumley P, Walmsley A, Walton R, Rippin J: Cleaning of oval canals using ultrasonic or sonic instrumentation. *J Endod* 19: 453-457 (1993)
- Lussi A, Portmann P, Nussbächer U, Imwinkelried S, Grosrey J: Comparison of two devices for root canal cleansing by the noninstrumentation technology. *J Endod* 25: 9-13 (1999)
- Maggiore C, Gallottini L, Resi JP: Mandibular first and second molar. The variability of roots and root canal system. *Minerva Stomatol* 47: 409-416 (1998)
- Martin H: Ultrasonic disinfection of the root canal. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 42: 92-99 (1976)
- Mauger MJ, Schindler WG, Walker WAR: An evaluation of canal morphology at different levels of root resection in mandibular incisors. *J Endod* 24: 607-609 (1998)

- Metzger Z, Teperovich E, Zary R, Cohen R, Hof R: The self-adjusting file (SAF). Part 1: respecting the root canal anatomy- a new concept of endodontic files and its implementation. J Endod 36: 679-690 (2010)
- Miserendino LJ, Miserendino CA, Moser JB, Heuer MA, Osetek EM: Cutting efficiency of endodontic instruments. Part III. Comparison of sonic and ultrasonic instrument systems. J Endod 14: 24-30 (1988)
- Nair P: On the causes of persistent apical periodontitis: a review. Int Endod J 39: 249-281 (2006)
- Nair P, Henry S, Cano V, Vera J: Microbial status of apical root canal system of human mandibular first molars with primary apical periodontitis after "one-visit" endodontic treatment. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 99: 231-252 (2005)
- Nair P, Sjögren U, Krey G, Kahnberg K, Sundqvist G: Intraradicular bacteria and fungi in root-filled, asymptomatic human teeth with therapy-resistant periapical lesions: a long-term light and electron microscopic follow-up study. J Endod 16: 580-588 (1990)
- Paqué F, Peters OA: Micro-computed tomography evaluation of the preparation of long oval root canals in mandibular molars with the self-adjusting file. J Endod 37: 517-521 (2011)
- Paqué F, Ganahl D, Peters OA: Effects of root canal preparation on apical geometry assessed by micro-computed tomography. J Endod 35: 1056-1059 (2009)
- Peters LB, Wesselink PR, van Winkelhoff AJ: Combinations of bacterial species in endodontic infections. Int Endod J 35: 698-702 (2002)
- Peters LB, Wesselink PR, Buijs JF, van Winkelhoff AJ: Viable bacteria in root dentinal tubules of teeth with apical periodontitis. J Endod 27: 76-81 (2001)
- Peters LB, Wesselink PR, Moorer WR: The fate and the role of bacteria left in root dentinal tubules. Int Endod J 28: 95-99 (1995)
- Peters OA: Current challenges and concepts in the preparation of root canal systems: a review. J Endod 30: 559-567 (2004)
- Peters OA, Peters CI, Schönenberger K, Barbakow F: ProTaper rotary root canal preparation: effects of canal anatomy on final shape analysed by micro CT. Int Endod J 36: 86-92 (2003)

- Peters OA, Schönenberger K, Laib A: Effects of four Ni-Ti preparation techniques on root canal geometry assessed by micro computed tomography. *Int Endod J* 34: 221-230 (2001a)
- Peters OA, Laib A, Göhring TN, Barbakow F: Changes in root canal geometry after preparation assessed by high-resolution computed tomography. *J Endod* 27: 1-6 (2001b)
- Peters OA, Laib A, Rügsegger P, Barbakow F: Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res* 79: 1405-1409 (2000)
- Portenier I, Lutz F, Barbakow F: Preparation of the apical part of the root canal by the Lightspeed and step-back techniques. *Int Endod J* 31: 103-111 (1998)
- Ram Z: Effectiveness of root canal irrigation. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 44: 306-312 (1977)
- Rhodes JS, Ford TR, Lynch JA, Liepins PJ, Curtis RV: Micro-computed tomography: a new tool for experimental endodontology. *Int Endod J* 32: 165-70 (1999)
- Rollison S, Barnett F, Stevens R: Efficacy of bacterial removal from instrumented root canals in vitro related to instrumentation technique and size. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 94: 366-371 (2002)
- Ruddle C: The ProTaper technique: endodontics made easier. *Dent Today* 20: 58-64, 66-68 (2001)
- Rwenyonyi CM, Kutesa A, Muwazi LM, Buwembo W: Root and canal morphology of mandibular first and second permanent molar teeth in a Ugandan population. *Odontology* 97: 92-96 (2009)
- Rödig T, Hülsmann M, Kahlmeier C: Comparison of root canal preparation with two rotary NiTi instruments: ProFile .04 and GT Rotary. *Int Endod J* 40: 553-562 (2007)
- Rödig T, Hülsmann M, Mühge M, Schäfers F: Quality of preparation of oval distal root canals in mandibular molars using nickel-titanium instruments. *Int Endod J* 35: 919-928 (2002)
- Schilder H: Cleaning and shaping the root canal. *Dent Clin North Am* 18: 269-296 (1974)
- Schäfer E, Lohmann D: Efficiency of rotary nickel-titanium FlexMaster instruments compared with stainless steel hand K-Flexofile--Part 1. Shaping ability in simulated curved canals. *Int Endod J* 35: 505-513 (2002)

- Siqueira JJ, Araújo M, Garcia P, Fraga R, Dantas C: Histological evaluation of the effectiveness of five instrumentation techniques for cleaning the apical third of root canals. *J Endod* 23: 499-502 (1997)
- Sonntag D: Schneidengeometrie und Effizienz voll rotierender Nickel-Titan- Feilen. *Endodontie* 12: 229-242 (2003)
- Sonntag D, Delschen S, Stachniss V: Root-canal shaping with manual and rotary Ni-Ti files performed by students. *Int Endod J* 36: 715-723 (2003)
- Sornkul E, Stannard JG: Strength of roots before and after endodontic treatment and restoration. *J Endod* 18: 440-443 (1992)
- Szep S, Gerhardt T, Leitzbach C, Lüder W, Heidemann D: Preparation of severely curved simulated root canals using engine-driven rotary and conventional hand instruments. *Clin Oral Investig* 5: 17-25 (2001)
- Tachibana H, Matsumoto K: Applicability of X-ray computerized tomography in endodontics. *Endod Dent Traumatol* 6: 16-20 (1990)
- Tan BT, Messer HH: The quality of apical canal preparation using hand and rotary instruments with specific criteria for enlargement based on initial apical file size. *J Endod* 28: 658-664 (2002)
- Thompson SA, Dummer PM: Shaping ability of Lightspeed rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 1. *J Endod* 23: 698-702 (1997a)
- Thompson SA, Dummer PM: Shaping ability of Lightspeed rotary nickel-titanium instruments in simulated root canals. Part 2. *J Endod* 23: 742-747 (1997b)
- Tronstad L: Clinical endodontics. Thieme, New York, USA: 188-199 (1991)
- Trope M, Ray HJ: Resistance to fracture of endodontically treated roots. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 73: 99-102 (1992)
- Tucker DM, Wenckus CS, Bentkover SK: Canal wall planning by engine-driven nickel-titanium instruments, compared with stainless-steel hand instrumentation. *J Endod* 23: 170-173 (1997)
- Valderhaug J: A histologic study of experimentally induced periapical inflammation in primary teeth in monkeys. *Int J Oral Surg* 3: 111-123 (1974)
- Valli KS, Lata DA, Jagdish S: An in vitro SEM comparative study of debridement ability of K-Files and Canal Master. *Indian J Dent Res* 7: 128-134 (1996)
- Versümer J, Hülsmann M, Schäfers F: A comparative study of root canal preparation using Profile .04 and Lightspeed rotary Ni-Ti instruments. *Int Endod J* 35: 37-46 (2002)

- Walia HM, Brantley WA, Gerstein H: An initial investigation of the bending and torsional properties of Nitinol root canal files. *J Endod* 14: 346-351 (1988)
- Walker TL, del Rio CE: Histological evaluation of ultrasonic and sonic instrumentation of curved root canals. *J Endod* 15: 49-59 (1989)
- Walton R, Torabinejad M: Principles and practice of endodontics. W.B. Saunders Co., Philadelphia, USA: (1996)
- Wasti F, Shearer AC, Wilson NH: Root canal systems of the mandibular and maxillary first permanent molar teeth of south Asian Pakistanis. *Int Endod J* 34: 263-266 (2001)
- Weiger R, Bartha T, Kalwitzki M, Löst C: A clinical method to determine the optimal apical preparation size. Part I. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 102: 686-691 (2006)
- Weiger R, ElAyouti A, Löst C: Efficiency of hand and rotary instruments in shaping oval root canals. *J Endod* 28: 580-583 (2002)
- Weine FS, Kelly RF, Lio PJ: The effect of preparation procedures on original canal shape and on apical foramen shape. *J Endod* 1: 255-262 (1975)
- Wu MK, van der Sluis LW, Wesselink PR: The capability of two hand instrumentation techniques to remove the inner layer of dentine in oval canals. *Int Endod J* 36: 218-224 (2003)
- Wu MK, Barkis D, Roris A, Wesselink PR: Does the first file to bind correspond to the diameter of the canal in the apical region? *Int Endod J* 35: 264-267 (2002)
- Wu MK, Wesselink PR: A primary observation on the preparation and obturation of oval canals. *Int Endod J* 34: 137-141 (2001)
- Wu MK, R'oris A, Barkis D, Wesselink PR: Prevalence and extent of long oval canals in the apical third. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 89: 739-743 (2000a)
- Wu MK, Fan B, Wesselink PR: Leakage along apical root fillings in curved root canals. Part I: effects of apical transportation on seal of root fillings. *J Endod* 26: 210-216 (2000b)
- Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P, Kulkarni GK: Influence of rotational speed, torque and operator proficiency on failure of greater Taper files. *Int Endod J* 35: 7-12 (2002)
- Yared GM, Bou Dagher FE, Machtou P: Influence of rotational speed, torque and operator's proficiency on ProFile failures. *Int Endod J* 34: 47-53 (2001)

Youssefzadeh S, Gahleitner A, Dorffner R, Bernhart T, Kainberger FM: Dental vertical root fractures: value of CT in detection. Radiology 210: 545-549 (1999)